

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217819

DESIGNING BRAZING FILLER METAL FOR HEAT-RESISTANT ALLOYS BASED ON Ni₃Al INTERMETALLIDE (p. 6–19)**Viktor Kvasnytskyi**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7756-5179>**Volodymyr Korzhyk**Guangdong Welding Institute (E. O. Paton Chinese-Ukrainian Institute of Welding), Guangzhou, China
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>**Viacheslav Kvasnytskyi**Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6698-7790>**Heorhii Mialnitsa**Gas Turbine Research And Production Complex Zorya-Mashproekt, Mykolaiv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2144-4519>**Chunlin Dong**Guangdong Welding Institute (E. O. Paton Chinese-Ukrainian Institute of Welding), Guangzhou, China
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2672-5985>**Tetiana Pryadko**G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1912-425X>**Maksym Matviienko**Kherson Branch Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1020-0415>**Yevhen Buturlia**Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2604-5664>

One of the most promising structural materials in gas turbine engineering is the alloys based on an intermetallide, the type of Ni₃Al, with an equiaxial and directional columnar structure. These materials make it possible to increase the working temperature of blades to 1,220 °C. The blades are made by the method of precise casting in a vacuum; in this case, it is necessary to technologically join the nozzle blades into blocks, to fix the signal holes in cooled blades, to correct casting defects.

Welding by melting intermetallide materials, as well as other cast heat-resistant nickel alloys (HNA), does not yield positive results. Therefore, various brazing techniques are used such as TLP-Bonding (Transient Liquid Phase Bonding). Filler metals' melting point is lower than that of the main metal. The key issue related to the technology of brazing HNA, including the design of appropriate filler metals, is the improvement of the physical-mechanical and operational properties of brazed joints.

This paper reports the established rational doping of a filler metal base, as well as depressants, the critical temperatures and surface properties of filler metals, their chemical composition, the structure and properties of brazed joints, the mode parameters, and brazing technology. To improve the stability of the structure and

the high-temperature strength of the brazed joints, the filler metal was alloyed with rhenium and tantalum. Mechanical tests of brazed joints at 900 °C were conducted in Ukraine; at a temperature of 1,100 °C – in the People's Republic of China. The test results showed that the short-term strength of alloy compounds with an equiaxial structure based on the Ni₃Al-type intermetallide at 1,100 °C is 0.98 of the strength of the main metal. The long-lasting strength at the same temperature meets the requirements for the strength of the main metal.

Keywords: brazed joints, microstructure of joints, chemical composition, short-term and long-lasting strength, brazing technology, tantalum, rhenium, boron.

References

- Kablov, E. N., Petrushin, N. V., Sidorov, V. V. Rhenium in the thermally stable nickel alloys for single crystal blades of gas turbine engines. 7th International symposium on Technetium and Rhenium Science and Utilization. Available at: <https://docplayer.ru/49222411-Rhenium-in-the-thermally-stable-nickel-alloys-for-single-crystal-blades-of-gas-turbine-engines.html>
- Kablov, E. N. (2012). Strategical areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030. *Aviatsionnye materialy i tehnologii*, 8, 7–17.
- Kablov, E. N., Ospennikova, O. G., Bazyleva, O. A. (2011). Materialy dlya vysokoteplo-nagruzhennykh detaley gazoturbinnyykh dvigateley. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie»*, SP2, 13–19. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/materialy-dlya-vysokoteplo-nagruzhennykh-detaley-gazoturbinnyykh-dvigatelay>
- Yue, X., Liu, F., Chen, H., Wan, D., Qin, H. (2018). Effect of Bonding Temperature on Microstructure Evolution during TLP Bonding of a Ni₃Al based Superalloy IC10. *MATEC Web of Conferences*, 206, 03004. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820603004>
- Intermetallic Alloy Development. A Program Evaluation (1997). Washington, DC: The National Academies Press. doi: <https://doi.org/10.17226/5701>
- Buntushkin, V. P., Kablov, E. N., Bazyleva, O. A. (1995). *Mekhanicheskie i ekspluatatsionnye svoystva liteynogo zharoprochnogo splava na osnove intermetallida Ni3Al. Metally*, 3, 70–73.
- Buntushkin, V. P., Bazyleva, O. A., Povarova, K. B., Kazanskaya, N. K. (1995). *Vliyanie struktury na mekhanicheskie svoystva legirovannogo intermetallida Ni3Al. Metally*, 8, 74–80.
- Sims, Ch. T., Stoloff, N. S., Xagel, U. K. (1995). *Supersplavy II: Zharoprochnyye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok. Vol. 1. Moscow: Metallurgiya*, 384.
- Yushchenko, K. A., Makhnenko, V. I., Savchenko, V. S., Chervyakov, N. O., Velikoivanenko, E. A. (2007). Investigation of Thermal-Deformation State of Welded Joints in Stable-Austenitic Steels and Nickel Alloys. *Welding in the World*, 51 (9-10), 51–55. doi: <https://doi.org/10.1007/bf03266600>
- Kvasnitskiy, V. F. (1986) *Svarka i Payka zharoprochnyykh splavov v sudostroenii. Leningrad: Sudostroenie*, 222.
- Kazakov, N. F. (Ed.) (1985). *Diffusion Bonding of Materials. Moscow: Mir Publishers*, 312.
- Krivtsov, I. V., Kvasnytskyi, V. V., Maksymov, S. Yu., Yermolaiev, H. V.; Paton, B. Ye. (Ed.) (2017). *Spetsialni sposoby zvariuvannya. Mykolaiv: NUK*, 346.
- Yermolaiev, H. V., Kvasnytskyi, V. V., Kvasnytskyi, V. F., Maksymova, S. V., Khorunov, V. F., Chyharov, V. V.; Khorunov, V. F., Kvasnytskyi, V. F. (Eds.) (2015). *Paianniya materialiv. Mykolaiv: NUK*, 340.

14. Petrushynets, L. V., Falchenko, I. V., Ustinov, A. I., Novomylnets, O. O., Yushchenko, S. M. (2019). Vacuum Diffusion Welding of Intermetallic Alloy γ -TiAl with High-Temperature Alloy EI437B Through Nanolayered Interlayers. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). doi: <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879918>
15. Kvasnytskyi, V. V., Myalnitsa, G. F., Matvienko, M. V., Buturlya, E. A., Chunlin, D. (2019). Investigation of interaction of Ni_3Al -based alloy with interlayers of different alloying systems for TLP-bonding. The Paton Welding Journal, 8, 12–17. doi: <https://doi.org/10.15407/as2019.08.03>
16. Zhang, H. R., Ghoneim, A., Ojo, O. A. (2010). TEM analysis of diffusion brazement microstructure in a Ni_3Al -based intermetallic alloy. Journal of Materials Science, 46 (2), 429–437. doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4884-7>
17. Zeng, K., Jin, Z. (1990). Optimization and calculation of the Hf-Ni phase diagram. Journal of the Less Common Metals, 166 (1), 21–27. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(90\)90362-n](https://doi.org/10.1016/0022-5088(90)90362-n)
18. Lukin, V. I., Ryl'nikov, B. C., Afanas'ev-Hodykin, A. N., Timofeeva, O. B. (2013). Osobennosti tehnologii diffuzionnoy Payki zharoprochnogo splava EP975 i liteynogo monokristallicheskogo intermetallidnogo splava VKNA-4U primenitel'no k konstruktсии «Blisk». Svarochnoe proizvodstvo, 7, 19–25.
19. Ryl'nikov, V. S., Afanasiev-Khodykin, A. N., Galushka, I. A. (2013). Technology of braze design type «Blisk» from dissimilar alloys. Trudy VIAM, 10. Available at: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/251.pdf>
20. Malashenko, I. S., Kurenkova, V. V., Belyavin, A. F., Trohimchenko, V. V. (2006). Kratkovremennaya prochnost' i mikrostruktura payanyh soedineniy splava VZhL12U, poluchennyh s ispol'zovaniem borsoderzhashchego pripoya s prisdokoy kremniya. Sovremennaya elektrometallurgiya, 4, 26–42.
21. Malashenko, I. S., Kurenkova, V. V., Onoprienko, E. V., Trohimchenko, V. V., Belyavin, A. F., Chervyakova, L. V. (2007). Mechanical properties and structure of brazed joints of cast nickel alloy ZhS-26VI. Part 1. Sovremennaya elektrometallurgiya, 1, 25–32. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/95519>
22. Malashenko, I. S., Mazurak, V. E., Kushnareva, T. N., Kurenkova, V. V., Zavidonov, V. G., Yavdoshchina, E. F. (2014). Payka v vakuume litogo nikelvevogo splava ZhS6U kompozitsionnymi pripoyami na osnove VPr-36. Chast' 1. Sovremennaya elektrometallurgiya, 4, 49–58. Available at: <https://patonpublishinghouse.com/sem/pdf/2014/pdfarticles/04/9.pdf>
23. Belyavin, A. F., Kurenkova, V. V., Malashenko, I. S., Grabin, V. V., Trohimchenko, V. V., Chervyakova, L. V. (2010). Prochnost' i mikrostruktura Payanyh soedineniy splava ZhS6U, poluchennyh s ispol'zovaniem bor- i borkremniysoderzhashchih pripoev. Sovremennaya elektrometallurgiya, 2, 40–51. Available at: <https://patonpublishinghouse.com/sem/pdf/2010/pdfarticles/02/10.pdf>
24. Kurenkova, V. V., Malashenko, I. S. (2008). High-temperature brazing of high-temperature casting alloys by boron containing braze alloy doped with silicon. Adgeziya rasplavov i payka materialov, 41, 63–87. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/4378>
25. Afanas'ev-Hodykin, A. N., Lukin, V. I., Ryl'nikov, V. S. (2010). Tehnologiya polucheniya nerazemnyh soedineniy iz splava ZhS36. Svarochnoe proizvodstvo, 7, 27–31.
26. Lukin, V. I., Ryl'nikov, V. S., Afanas'ev-Hodykin, A. N., Orehov, N. G. (2012). Osobennosti payki monokristallicheskih otlivok iz splava ZhS32. Svarochnoe proizvodstvo, 5, 24–30. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18820125>
27. Maksimova, S. V., Horunov, V. F., Myasoed, V. V., Voronov, V. V., Koval'chuk, P. V. (2014). Mikrostruktura payanyh soedineniy alyuminidov nikelya. Avtomaticheskaya svarka, 10, 17–23. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2014_10_4
28. Maksymova, S. V., Voronov, V. V., Kovalchuk, P. V. (2017). Brazing filler metal without boron and silicon for brazing of heat-resistant nickel alloy. Automatic Welding, 8, 15–21. doi: <https://doi.org/10.15407/as2017.08.02>
29. Myalnitsa, G. F., Maksuita, I. I., Kvasnitskaya, Yu. G., Mihnyan, E. V. (2013). Selection of new-alloying corrosion-resistant alloy for the nozzle blades. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, 2, 29–34. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MOM_2013_2_8
30. Kablov, E. N., Petrushin, N. V., Vasilenok, L. B., Morozova, G. I. (2000). Reniy v zharoprochnykh nikelovykh splavakh dlya lopatok gazovykh turbin. Materialovedenie, 2, 23–29.
31. Kablov, E. N., Petrushin, N. V., Vasilenok, L. B., Morozova, G. I. (2000). Reniy v zharoprochnykh nikelovykh splavakh dlya lopatok gazovykh turbin (prodolzhenie). Materialovedenie, 3, 38–43.
32. Petrunin, I. E., Bereznikov, Yu. I., Bun'kina, R. R., Il'ina, I. I., Markova, I. Yu., Kiselev, I. I. et. al.; Petrunin, I. E. (Ed.) (2003). Spravochnik po payke. Moscow: Mashinostroyeniye, 480.
33. Kvasnitskiy, V. V., Timchenko, V. L., Khorunov, V. F. (1998). Die Untersuchung des Systems Ni(Nileg)-Hf-Zr für das Löten warmfester Nickellegierungen. DVS-Berichte: Band 192. Düsseldorf: DVS – Verl, 257–259.
34. Kablov, E. N., Svetlov, I. L., Petrushin, N. V. (1997). Nikelevye zharoprochnye splavy dlya lit'ya lopatok s napravlennoy i monokristallicheskoy strukturoy. Chast' 1. Materialovedenie, 4.
35. Massalski, P. R., Subramanian, H. O., Okamoto, H., Kacprzak, I. (Eds.) (1990). Binary Alloy Phase Diagrams. Vol. 3. Ohio: ASM International Materials Park, 3589.
36. Gayduk, S., Kononov, V. (2016). Phase composition calculation by CALPHAD-method of hightemperature corrosion-resistant weldable nickel-base cast alloy. Vestnik dvigatelestroyeniya, 1, 107–112. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2016_1_21
37. Koneva, N. A., Popova, N. A., Kalashnikov, M. P., Nikonenko, E. L., Fedorishcheva, M. V., Pasenova, A. D., Kozlov, E. V. (2013). Vliyanie temperatury deformatsii na fazoviy sostav i strukturu intermetallida Ni_3Al , legirovannogo borom i gafniem. Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya, 10 (3), 340–348. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/287457681.pdf>
38. Samsonov, G. V., Vinnitskiy, I. M. (1976). Tugoplavkie soedineniya. Moscow: Metallurgiya, 560.
39. Matsugi, K., Murata, Y., Morinaga, M., Yukawa, N. (1992). Realistic Advancement for Nickel-Based Single Crystal Superalloys by the d-Electrons Concept. Superalloys 1992 (Seventh International Symposium). doi: https://doi.org/10.7449/1992/superalloys_1992_307_316

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217674

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FATIGUE CONTACT STRENGTH OF SURFACES HARDENED BY CEMENTATION AND THE ION-PLASMA NITRIDING AVINIT N (p. 20–27)

Alex Sagalovych

JSC «FED», Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2136-2740>

Viktor Popov

JSC «FED», Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7216-2138>

Vladislav Sagalovych

NTC «Nanotechnology», Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8060-3201>

Stanislav Dudnik

JSC «FED», Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2074-4739>

Vladimir Bogoslavzev

JSC «FED», Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2063-2876>

Nik Stadnichenko

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7014-1314>

Andrey Edinovich

SE Ivchenko-Progress, Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9224-7075>

This paper reports comparative tribotechnical tests of surfaces, hardened by cementation and plasma nitriding Avinit N, for contact fatigue strength at friction in rolling with slipping. Following the cementation, the samples' hardened layer thickness was 1.2 mm; on nitriding, the thickness of the hardened layer was 0.25 mm. The tests were carried out using an acoustic emission method, which is extremely sensitive when registering the transition of tribosystems' operation from the normal (mechanochemical) wear to the initial surface destruction of a fatigue nature.

The tests have shown that the average number of cycles before the initial destruction due to fatigue for the samples hardened by the Avinit nitriding technology is 1.82-time higher compared to the cementation-hardened samples. The depth of damage at the surface of the cemented samples could vary between 0.01 and 0.027 mm depending on the diameter of the damage. For the nitrided surfaces, the depth of damage did not exceed 0.003 mm.

The samples' resistance to the fatigue wear (destruction) was determined by tests based on 1,000,000 cycles at contact loads $\sigma_{max}=1,140$ MPa, typical of medium-loaded surfaces. The test results demonstrated that the integrated multicyclic resistance to fatigue wear (destruction) of the samples, hardened by nitriding, is more than 10 times higher than that of the cementation-hardened samples.

The study reported here confirms the effectiveness of using the Avinit ion-plasma nitriding technology instead of cementing, to improve the contact strength of the parts' surfaces. At the same time, worth noting are the advantages of this technology to maintain the size and high quality of surface treatment, which eliminates the need to mechanically finish them after hardening.

Keywords: friction; rolling with surface slipping, contact fatigue strength; gas cementation; plasma nitriding.

References

- Fedorov, V. V. (1985). Kinetika povrezhdaemosti i razrusheniya materialov. Tashkent: FAN, 175.
- Ibatullin, I. D. (2008). Kinetika ustalostnoy povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnykh sloev. Samara: Samar. gos. tehn. un-t, 387.
- Arzamasov, B. N., Bratuhin, A. G., Eliseev, Yu. S., Panayoti, T. A. (1999). Ionnyaya himiko-termicheskaya obrabotka splavov. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 400.
- Zinchenko, V. M., Syropyatov, V. Ya., Prusakov, B. A., Perekatov, Yu. A. (2003). Azotniy potentsial: sovremennoe sostoyanie problemy i kontseptsiya razvitiya. Moscow: FGUP «Izdatel'stvo «Mashinostroeniye», 90.
- Kaplun, V. G., Kaplun, P. V. (2015). Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnykh sredah. Hmel'nits'kiy: HNU, 318.
- Wu, Y. S., Ma, B. T., He(HO), J. W., Luo, B. Z. (1989). A criterion for contact fatigue of ion-nitrided gear. Wear, 129 (1), 13–21. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(89\)90275-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(89)90275-5)
- Boniardi, M., D'Errico, F., Tagliabue, C. (2006). Influence of carburizing and nitriding on failure of gears – A case study. Engineering Failure Analysis, 13 (3), 312–339. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.02.021>
- Terent'ev, V. F., Michugina, M. S., Kolmakov, A. G., Kvedaras, V., Čiuplys, V., Čiuplys, A., Vilyis, J. (2007). The effect of nitriding on fatigue strength of structural alloys. MECHANIKA, 2 (64), 12–22.
- Gerasimov, S. A., Kuksenova, L. I., Alekseeva, M. S. (2017). Peculiarities of structure and tribological properties formation of the nitrided steel and alloy. Bulletin of Science and Technical Development, 7 (119), 3–17.
- Conrado, E., Gorla, C., Davoli, P., Boniardi, M. (2017). A comparison of bending fatigue strength of carburized and nitrided gears for industrial applications. Engineering Failure Analysis, 78, 41–54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.03.006>
- Kaplun, P. V., Gonchar, V. A. (2015). Effect on durability ion nitriding open gears. Problems of Tribology, 2, 84–89.
- Kaplun, P. V., Honchar, V. A., Donchennko, T. V., Matviichin, P. V. (2019). Influence of ionic nitriding and remaining austenite on longevity permanent at friction wobbling. Herald of Khmelnytskyi national university, 1, 122–129. Available at: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/7581>
- Shetty, K., Kumar, S., Raghobhama Rao, P. (2009). Effect of ion nitriding on the microstructure and properties of Maraging steel (250 Grade). Surface and Coatings Technology, 203 (10–11), 1530–1536. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.11.034>
- Sirin, S. Y., Sirin, K., Kaluc, E. (2008). Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel. Materials Characterization, 59 (4), 351–358. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.01.019>
- Rolinski, E., Damirgi, T., Woods, M. S. (2015). Ion Nitriding of Ferrous and Titanium Alloys for Gear Applications. Thermal Processing, 36–40.
- Fomina, L. P., Krymov, V. V. (2016). Sovershenstvovanie tehnologii uprochneniya zubchatykh koles aviadvigatelay. Dvigatel', 2 (104), 6–8.
- Sahalovych, O. V., Sahalovych, V. V. (2013). Pat. No. 84664 UA. Spisib ionno-plazmovoho pretsyziynoho azotuvannya poverkhon staley i splaviv Avinit N. No. u201305770; declared: 16.08.2013; published: 25.10.2013, Bul. No. 23.
- Sahalovych, O. V., Sahalovych, V. V. (2013). Pat. No. 107408 UA. Spisib ionno-plazmovoho pretsyziynoho azotuvannya poverkhon detali zi staley i splaviv avinit N. No. a201305768; declared: 07.05.13; published: 25.12.2014, Bul. No. 24.
- Filonenko, S. F., Stadnichenko, V. N. (2007). Avtomatizatsiya issledovaniy protsessov samoorganizatsii tribosistem. Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotehnicheskie komplekxy i sistemy, 1 (18), 164–167.
- Stadnychenko, M. H., Dzhus, R. M., Troshyn, O. M. (2004). Pro hranytsi zastosuvannya metodu akustychnoi emisii pry vyrishenni zadach trybodiagnostyky. Zbirnyk naukovykh prats XI VPS, 1 (10), 187–195.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217281

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF ALLOYING WITH Si AND Cr ON THE PROPERTIES OF MANGANESE AUSTENITE BASED ON AB INITIO MODELLING (p. 28–36)

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>

Iryna Semyanyk

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2378-267X>

Volodymyr Kotsyubynsky

State Higher Educational Institution “Vasyl Stefanyk Precarpathian National University”, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6461-937X>

Liubomyr Troshchuk

Utility company «Municipal Road Company», Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8594-7946>

Sergiy Korniy

Karpenko Physico-Mechanical Institute National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3998-2972>

Volodymyr Artym

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8938-552X>

This paper reports a study into estimating the impact of dissolved Si and Cr on the crystalline structure, certain mechanical characteristics, and stability of manganese austenite. The theoretical study was based on the first-principle calculations within a density functional theory (DFT) for austenite structures, which were modeled in the form of 2×2×2 superlattices based on a face-centered cubic lattice.

Atoms in the model superlattices were arranged considering the experimental results from analyzing the Mossbauer spectrum and the X-ray phase analysis of experimental alloys corresponding to high manganese steels. The superlattices that represented the structure of the alloyed austenite contained the C atom in the central octahedral pore, which, relative to the Si(Cr) and Mn atoms, was located in the first and second coordinating spheres, respectively.

The analysis of calculation results reveals that the dissolution of Si and Cr in manganese austenite leads to an increase in the stability of the austenite phase, both according to the results from modeling within the DFT and based on the findings from the thermodynamic analysis. At the same time, the austenite phase is transferred to the region of plastic materials according to the ratio of the volumetric elasticity to shear modules of ≥ 1.75 (a B/G criterion). Determining the density of electronic states shows that among the structures studied, the lowest number of electrons at the Fermi level, which indicates the highest electrochemical stability, is characterized by manganese austenite alloyed by Cr.

The results of this study provide grounds for expanding the systems of alloying high manganese steels by introducing a significant amount (up to 10 at. %) of Si and Cr, in particular for the application of wear, shock, and corrosion-resistant coatings by the method of electric arc surfacing.

Keywords: high manganese steel, first-principle calculations, Mossbauer spectroscopy, alloying elements, wear-resistant coatings.

References

- Vitos, L., Nilsson, J.-O., Johansson, B. (2006). Alloying effects on the stacking fault energy in austenitic stainless steels from first-principles theory. *Acta Materialia*, 54 (14), 3821–3826. doi: <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.04.013>
- Ostapovets, A. (2010). Atomistic model of type-II twin boundary. *Computational Materials Science*, 49 (4), 882–887. doi: <http://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.06.041>
- Mosecker, L., Saeed-Akbari, A. (2013). Nitrogen in chromium–manganese stainless steels: a review on the evaluation of stacking fault energy by computational thermodynamics. *Science and Technology of Advanced Materials*, 14 (3), 033001. doi: <http://doi.org/10.1088/1468-6996/14/3/033001>
- Tatsiy, R. M., Pazen, O. Y., Vovk, S. Y., Ropyak, L. Y., Pryhorovska, T. O. (2019). Numerical study on heat transfer in multilayered structures of main geometric forms made of different materials. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 13 (2), 36–55. doi: <http://doi.org/10.24874/jsscm.2019.13.02.04>
- Volchenko, N., Volchenko, A., Volchenko, D., Poliakov, P., Malyk, V., Zhuravliov, D. et. al. (2019). Features of the estimation of the intensity of heat exchange in self-ventilated disk-shoe brakes of vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (97)), 47–53. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154712>
- Ropyak, L., Ostapovych, V. (2016). Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (5 (80)), 50–62. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65719>
- Drábiková, J., Pastorek, F., Fintová, S., Doležal, P., Wasserbauer, J. (2016). Improvement of bio-compatible AZ61 magnesium alloy corrosion resistance by fluoride conversion coating. *Koroze a Ochrana Materialu*, 60 (5), 132–138. doi: <http://doi.org/10.1515/kom-2016-0021>
- Saakiyan, L. S., Efremov, A. P., Ropyak, L. Ya. (1989). Effect of stress on the microelectrochemical heterogeneity of steel. *Protection of Metals*, 25 (2), 185–189.
- Kresse, G., Furthmüller, J. (1996). Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set. *Computational Materials Science*, 6 (1), 15–50. doi: [http://doi.org/10.1016/0927-0256\(96\)00008-0](http://doi.org/10.1016/0927-0256(96)00008-0)
- Hafner, J., Kresse, G. (1997). The Vienna AB-Initio Simulation Program VASP: An Efficient and Versatile Tool for Studying the Structural, Dynamic, and Electronic Properties of Materials. *Properties of Complex Inorganic Solids*, 69–82. doi: http://doi.org/10.1007/978-1-4615-5943-6_10
- Clark, S. J., Segall, M. D., Pickard, C. J., Hasnip, P. J., Probert, M. I. J., Refson, K., Payne, M. C. (2005). First principles methods using CASTEP. *Zeitschrift Für Kristallographie – Crystalline Materials*, 220 (5/6), 567–570. doi: <http://doi.org/10.1524/zkri.220.5.567.65075>
- Duryagina, Z. A., Bespalov, S. A., Borysyuk, A. K., Pidkova, V. Ya. (2011). Magnetometric analysis of surface layers of 12X18H10T steel after ion-beam nitriding. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 33 (5), 615–622.
- Tatarenko, V. A., Radchenko, T. M., Nadutov, V. M. (2003). Parameters of interatomic interaction in a substitutional alloy F.C.C. Ni-Fe according to experimental data about the magnetic characteristics and equilibrium values of intensity of a diffuse scattering of radiations. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 25 (10), 1303–1319.
- Dong, N., Jia, R., Wang, J., Fan, G., Fang, X., Han, P. (2019). Composition Optimum Design and Strengthening and Toughening Mechanisms of New Alumina-Forming Austenitic Heat-Resistant Steels. *Metals*, 9 (9), 921. doi: <http://doi.org/10.3390/met9090921>
- Zhou, Y., Li, Y., Wang, W., Qian, L., Xiao, S., Lv, Z. (2018). Effect of interstitial nitrogen in Fe18Cr6Mn8 austenitic alloys from density functional theory. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 463, 57–63. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.05.034>
- Oila, A., Bull, S. J. (2009). Atomistic simulation of Fe–C austenite. *Computational Materials Science*, 45 (2), 235–239. doi: <http://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.09.013>
- Lv, Z. Q., Wang, B., Sun, S. H., Fu, W. T. (2015). Effect of atomic sites on electronic and mechanical properties of (Fe,Mo)6C carbides. *Journal of Alloys and Compounds*, 649, 1089–1093. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.249>
- Sevsek, S., Bleck, W. (2018). Ab Initio-Based Modelling of the Yield Strength in High-Manganese Steels. *Metals*, 8 (1), 34. doi: <http://doi.org/10.3390/met8010034>
- Lv, Z. Q., Shi, Z. P., Li, Y. (2012). First-Principles Study on the Structural, Electronic and Elastic Properties of Alloyed Austenite

- with Co and Ni. *Advanced Materials Research*, 503-504, 684–687. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.503-504.684>
20. Reeh, S., Music, D., Gebhardt, T., Kasprzak, M., Jäpel, T., Zaefferer, S. et. al. (2012). Elastic properties of face-centred cubic Fe–Mn–C studied by nanoindentation and ab initio calculations. *Acta Materialia*, 60 (17), 6025–6032. doi: <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.07.038>
21. Guo, T., Siska, F., Cheng, J., Barnett, M. (2018). Initiation of basal slip and tensile twinning in magnesium alloys during nanoindentation. *Journal of Alloys and Compounds*, 731, 620–630. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.088>
22. Perdew, J. P., Burke, K., Ernzerhof, M. (1997). Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Physical Review Letters*, 78 (7), 1396–1405. doi: <http://doi.org/10.1103/physrevlett.78.1396>
23. Monkhorst, H. J., Pack, J. D. (1976). Special points for Brillouin-zone integrations. *Physical Review B*, 13 (12), 5188–5192. doi: <http://doi.org/10.1103/physrevb.13.5188>
24. Vanderbilt, D. (1990). Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism. *Physical Review B*, 41 (11), 7892–7895. doi: <http://doi.org/10.1103/physrevb.41.7892>
25. 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: <http://doi.org/10.1186/s40192-014-0029-1>
26. Hallstedt, B., Khvan, A. V., Lindahl, B. B., Selleby, M., Liu, S. (2017). PrecHiMn-4 – A thermodynamic database for high-Mn steels. *Calphad*, 56, 49–57. doi: <http://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.11.006>
27. 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: <http://doi.org/10.2478/mspe-2020-0013>
28. Prisyazhnyuk, P., Lutsak, D., Vasylyk, A., Shihab, T., Burda, M. (2015). Calculation of surface tension and its temperature dependence for liquid Cu-20Ni-20Mn alloy. *Management Systems in Production Engineering*, 12, 346–350.
29. Kryl', Y. A., Prisyazhnyuk, P. M. (2013). Structure formation and properties of NbC-Hadfield steel cermets. *Journal of Superhard Materials*, 35 (5), 292–297. doi: <http://doi.org/10.3103/s1063457613050043>
30. Sabzi, M., Dezfili, S. M. (2018). Post weld heat treatment of hyper-eutectoid hadfield steel: Characterization and control of microstructure, phase equilibrium, mechanical properties and fracture mode of welding joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 313–328. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.009>
31. Timoshevskii, A. M., Yablonovskii, S. O., Yerebin, V. I. (2011). Computer Simulation of Atomic Structure and Hyperfine Interactions in Fe–C Austenite. *Uspehi Fiziki Metallo*, 12 (4), 451–470. doi: <http://doi.org/10.15407/ufm.12.04.451>
32. Guo, G. Y., Yablonovskii, S. O., Wang, H. H. (2000). Gradient-corrected density functional calculation of elastic constants of Fe, Co and Ni in bcc, fcc and hcp structures. *Chinese Journal of Physics*, 38 (5), 949–961.
33. Seki, I., Nagata, K. (2005). Lattice Constant of Iron and Austenite Including Its Supersaturation Phase of Carbon. *ISIJ International*, 45 (12), 1789–1794. doi: <http://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1789>
34. Sahalianov, I. Y., Radchenko, T. M., Tatarenko, V. A., Cuniberti, G., Prylutskyy, Y. I. (2019). Straintronics in graphene: Extra large electronic band gap induced by tensile and shear strains. *Journal of Applied Physics*, 126 (5), 054302. doi: <http://doi.org/10.1063/1.5095600>
35. Wu, Z., Zhao, E., Xiang, H., Hao, X., Liu, X., Meng, J. (2007). Crystal structures and elastic properties of superhard IrN₂ and IrN₃ from first principles. *Physical Review B*, 76 (5). doi: <http://doi.org/10.1103/physrevb.76.054115>
36. Lyakhov, A. O., Oganov, A. R. (2011). Evolutionary search for superhard materials: Methodology and applications to forms of carbon and TiO₂. *Physical Review B*, 84 (9). doi: <http://doi.org/10.1103/physrevb.84.092103>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217297

AN ANALYSIS OF COIL DIMENSIONS ON INDUCTION HEATING MACHINE AGAINST MICROSTRUCTURE AND HARDNESS DISTRIBUTION AS NEW CANDIDATE OF PROJECTILE-RESISTANT STEEL PLATES MATERIALS (p. 37–44)

Helmy Purwanto

Universitas Wahid Hasyim, Sampangan, Semarang, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2280-9236>

Mohammad Tauviquirrahman

Universitas Diponegoro, Tembalang, Semarang, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2694-4184>

Muhammad Dzulfikar

Universitas Wahid Hasyim, Sampangan, Semarang, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5140-9701>

Rifky Ismail

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

Purnomo

Universitas Muhammadiyah Semarang, Semarang, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-2432>

Syifauddin, Ahnas

Universitas Wahid Hasyim, Sampangan, Semarang, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7430-5021>

The field of defense and security requires ballistic resistant materials for self-protection. Ballistic resistant materials must be able to withstand projectile spin rate and absorb impact energy. A combination of hardness on the surface and ductility on the other side is required to make the projectile resistance plate. Hardness is required to withstand the projectile rate, while ductility is required to reduce cracking, brittle fracture and absorption of impact energy. The objective of this study is to find the effect of the coil shape on microstructure and hardness distribution on the steel plate that is carried out by surface hardening using an induction machine. Medium carbon steel plate with the thickness 8 mm is austenitized using the induction heating machine with coil dimension and shape variations. Austenitizing on the surface and rapid quenching in oil media are up to 900 °C. A micro-observation was conducted on quench plates and hardness distribution on their cross-section. The result of microstructure observation and micro Vickers hardness test of coil variation at a diameter 5 mm and with the number of turns of 2 and 3 is microstructures on all sides formed with martensite structure and equal hardness on the entire cross-section, so that no surface hardening formed. Micro-observations showed martensite structure on the surface side and the ferrite and perlite structures are still visible on the middle and lower sides using 8 mm diameter coils and 2 turns. The maximum hardness is 497 HVN on the upper side surface and 257 HVN on the lower side surface using an 8 mm diameter coil and 2 turns. An increased hardness on one of the plate surfaces while maintaining the ductile on the opposite side can be proposed as a candidate for a ballistic-resistant plate through further research.

Keywords: heating coil, induction heating machine, surface hardening, hardness distribution, ballistic material.

References

1. Jena, P. K., Mishra, B., Ramesh Babu, M., Babu, A., Singh, A. K., SivaKumar, K., Bhat, T. B. (2010). Effect of heat treatment on

- mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *International Journal of Impact Engineering*, 37 (3), 242–249. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.09.003>
2. Purwanto, H., Soenoko, R., Purnowidodo, A., Suprpto, A. (2018). Energy absorbers on the steel plate – rubber laminate after deformable projectile impact. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (94)), 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127345>
 3. Purwanto, H., Soenoko, R., Purnowidodo, A., Suprpto, A. (2020). The Influence of Single and Double Steel Plate Hardness on Fracture Behavior after Ballistic Impact. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64 (3), 189–198. doi: <https://doi.org/10.3311/ppme.11780>
 4. Dey, S., Børvik, T., Teng, X., Wierzicki, T., Hopperstad, O. S. (2007). On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation. *International Journal of Solids and Structures*, 44 (20), 6701–6723. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.03.005>
 5. Senthil, K., Iqbal, M. A. (2020). Prediction of superior target layer configuration of armour steel, mild steel and aluminium 7075-T651 alloy against 7.62 AP projectile. *Structures*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.010>
 6. Purwanto, H., Dzulfikar, M., Tauviqirrahman, M., Ismail, R., Les-tari, N. (2019). The Effect of Tempering Temperature on Medium Carbon Steel Plate of Surface Hardening Result Using Induction Heating as Ballistic Resistant Material Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 694, 012041. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/694/1/012041>
 7. Jo, M. C., Kim, S., Suh, D. W., Hong, S. S., Kim, H. K., Sohn, S. S., Lee, S. (2020). Effect of tempering conditions on adiabatic shear banding during dynamic compression and ballistic impact tests of ultra-high-strength armor steel. *Materials Science and Engineering: A*, 792, 139818. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139818>
 8. Jena, P. K., Senthil P, P., K., S. K. (2016). Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. *Journal of Applied Research and Technology*, 14 (1), 47–53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.02.002>
 9. Zhang, P., Wang, Z., Zhao, P., Zhang, L., Jin, X. C., Xu, Y. (2019). Experimental investigation on ballistic resistance of polyurea coated steel plates subjected to fragment impact. *Thin-Walled Structures*, 144, 106342. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106342>
 10. Liu, Q.-Q., Wang, S.-P., Lin, X., Cui, P., Zhang, S. (2020). Numerical simulation on the anti-penetration performance of polyurea-core Weldox 460 E steel sandwich plates. *Composite Structures*, 236, 111852. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111852>
 11. Jena, P. K., Ramanjeneyulu, K., Siva Kumar, K., Balakrishna Bhat, T. (2009). Ballistic studies on layered structures. *Materials & Design*, 30 (6), 1922–1929. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.008>
 12. Rahman, N., Abdullah, S., Abdullah, M., Zamri, W., Omar, M., Sa-juri, Z. (2018). Experimental and Numerical Investigation on the Layering Configuration Effect to the Laminated Aluminium/Steel Panel Subjected to High Speed Impact Test. *Metals*, 8 (9), 732. doi: <https://doi.org/10.3390/met8090732>
 13. Yuriyanto, Y., Pratikto, P., Soenoko, R., Suprpto, W. (2019). Effect of quench and temper on hardness and wear of HRP steel (armor steel candidate). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (99)), 55–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156799>
 14. Mishra, B., Jena, P. K., Ramakrishna, B., Madhu, V., Bhat, T. B., Gupta, N. K. (2012). Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic impact behavior and ASB formation of a high strength steel. *International Journal of Impact Engineering*, 44, 17–28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.12.004>
 15. Lou, D. C., Solberg, J. K., Børvik, T. (2009). Surface strengthening using a self-protective diffusion paste and its application for ballistic protection of steel plates. *Materials & Design*, 30 (9), 3525–3536. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.003>
 16. Holmen, J. K., Solberg, J. K., Hopperstad, O. S., Børvik, T. (2017). Ballistic impact of layered and case-hardened steel plates. *International Journal of Impact Engineering*, 110, 4–14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.02.001>
 17. Lope, I., Acero, J., Carretero, C. (2016). Analysis and Optimization of the Efficiency of Induction Heating Applications With Litz-Wire Planar and Solenoidal Coils. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (7), 5089–5101. doi: <https://doi.org/10.1109/tpe.2015.2478075>
 18. Huang, M.-S., Huang, Y.-L. (2010). Effect of multi-layered induction coils on efficiency and uniformity of surface heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (11-12), 2414–2423. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.01.042>
 19. Nian, S.-C., Tsai, S.-W., Huang, M.-S., Huang, R.-C., Chen, C.-H. (2014). Key parameters and optimal design of a single-layered induction coil for external rapid mold surface heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 109–117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.019>
 20. Dikshit, S. N., Kutumbarao, V. V., Sundararajan, G. (1995). The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates. *International Journal of Impact Engineering*, 16 (2), 293–320. doi: [https://doi.org/10.1016/0734-743x\(94\)00041-t](https://doi.org/10.1016/0734-743x(94)00041-t)
 21. Ismail, R., Aldiyaz, F., Bakar, M. A., Nugroho, S. (2018). Pengaruh Frekuensi Arus Induksi Terhadap Distribusi Kekerasan Pada Teknik Pengerasan Quenching Permukaan Menggunakan Teknik Induksi Statis Pada Camshaft Mesin Diesel 2 Silinder. *Simposium Nasional RAPI XVII*, 141–147. Available at: <http://hdl.handle.net/11617/10639>
 22. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., Black, M. (2003). *Handbook of Induction Heating*. Marcell Dekker Inc.
 23. Kelly, P. M., Nutting, J. (1960). The martensite transformation in carbon steels. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 259 (1296), 45–58. doi: <https://doi.org/10.1098/rspa.1960.0210>
-
- DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217691**
IDENTIFICATION OF REGULARITIES OF FORMATION OF THE PHASE-STRUCTURAL STATE AND PROPERTIES OF COATINGS OBTAINED BY MICRO-ARC OXIDATION OF HIGH-STRENGTH V95 ALLOY (p. 45–54)
- 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 Belozеров**
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7623-3658>
- The influence of electrolyte composition and electrolysis modes on the surface morphology, growth kinetics, phase-structural state, and mechanical properties of MAO coatings on the V95 aluminum alloy (with Zn as the main alloying element) was studied. The possibility of forming a continuous MAO coating on the V95 alloy with a base layer thickness of more than 100 μm and a surface roughness of less than 5 μm was found. The study of the growth kinetics of MAO coatings on the V95 alloy showed that the highest growth rate of the base coating layer

(about 0.83 $\mu\text{m}/\text{min}$) occurs in the 1 g/L KOH+6 g/L Na_2SiO_3 electrolyte. Although an increase in the relative content of the silicate component (Na_2SiO_3) provides a fairly high growth rate of the coating, the growth rate of the base layer remains rather low (0.38–0.40 $\mu\text{m}/\text{min}$). This makes the oxidation process in these electrolytes less technological.

The study of the phase-structural state of the base coating layer showed that it has a crystalline structure, in which the main phase is aluminum oxide $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (90–97%). Crystallites of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) are formed as the second phase. With an increase in process time in electrolytes with the highest relative content of the alkaline component (1 g/L KOH+6 g/L Na_2SiO_3), the relative content of the hardest $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase increases (up to 5%). The hardness of such coatings with an oxidation time of 180 minutes reaches 14,000 MPa. Thus, the study has shown the advisability of using MAO treatment for the V95 alloy, since it can significantly increase the surface hardness and thereby guarantee its high wear resistance. The combination of high hardness with a relatively high coating growth rate makes it possible to recommend oxidation in the 1 g/L KOH and 6 g/L Na_2SiO_3 electrolyte as the most technologically advanced for improving the mechanical characteristics of the surface of products made of V95 alloy.

Keywords: micro-arc oxidation, anode-cathode mode, electrolyte composition, Al–Zn–Mg–Cu, thickness, phase composition, hardness.

References

- Hlushkova, D. B., Ryzhkov, Y. V., Kostina, L. L., Demchenko, S. V. (2018). Increase of wear resistance of the critical parts of hydraulic hammer by means of ion-plasma treatment. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1 (113), 208–211.
- Fedirko, V. M., Pohrelyuk, I. M., Luk'yanenko, O. H., Lavry's, S. M., Kindrachuk, M. V., Dukhota, O. I. et. al. (2018). Thermomdiffusion 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>
- Sobol, O. V., Postelnyk, A. A., Meylekhov, A. A., Andreev, A. A., Stolbovoy, V. A., Gorban, V. F. (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)
- Glushchenko, M. A., Belozorov, V. V., Sobol, O. V., Subbotina, V. V., Zelenskaya, G. I. (2017). Effect of Tantalum on the Texture of Copper Vacuum Condensates. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 9 (2), 02015-1–02015-5. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(2\).02015](https://doi.org/10.21272/jnep.9(2).02015)
- Mayrhofer, P. H., Mitterer, C., Hultman, L., Clemens, H. (2006). Microstructural design of hard coatings. *Progress in Materials Science*, 51 (8), 1032–1114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.002>
- Sobol, O. V., Andreev, A. A., Gorban, V. F., Meylekhov, A. A., Postelnyk, H. O., Stolbovoy, V. A. (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)
- Rocha, R. C., Galdino, A. G. de S., Silva, S. N. da, Machado, M. L. P. (2018). Surface, microstructural, and adhesion strength investigations of a bioactive hydroxyapatite-titanium oxide ceramic coating applied to Ti-6Al-4V alloys by plasma thermal spraying. *Materials Research*, 21 (4). doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-1144>
- Bekkara, M. F., Dascalescu, L., Benmimoun, Y., Zeghloul, T., Tilmantine, A., Zouzou, N. (2018). Modification of surface characteristic and tribo-electric properties of polymers by DBD plasma in atmospheric air. *The European Physical Journal Applied Physics*, 81 (1), 10801. doi: <https://doi.org/10.1051/epjap/2017170149>
- Wei, C. C. (2012). Analyses of Material Properties of Nitrided AISI M2 Steel Treated by Plasma Immersion Ion Implantation (PIII) Process. *Advanced Science Letters*, 12 (1), 148–154. doi: <https://doi.org/10.1166/asl.2012.2807>
- 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>
- Nii, H., Nishimoto, A. (2012). Surface modification of ferritic stainless steel by active screen plasma nitriding. *Journal of Physics: Conference Series*, 379, 012052. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/379/1/012052>
- Aydin, H., Bayram, A., Topçu, Ş. (2013). Friction Characteristics of Nitrided Layers on AISI 430 Ferritic Stainless Steel Obtained by Various Nitriding Processes. *Materials Science*, 19 (1). doi: <https://doi.org/10.5755/j01.ms.19.1.3819>
- Araújo, E. de, Bandeira, R. M., Manfrinato, M. D., Moreto, J. A., Borges, R., Vales, S. dos S. et. al. (2019). Effect of ionic plasma nitriding process on the corrosion and micro-abrasive wear behavior of AISI 316L austenitic and AISI 470 super-ferritic stainless steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (2), 2180–2191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.02.006>
- Köster, K., Kaestner, P., Bräuer, G., Hoche, H., Troßmann, T., Oechsner, M. (2013). Material condition tailored to plasma nitriding process for ensuring corrosion and wear resistance of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 228, S615–S618. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.10.059>
- 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>
- Sun, Y., Chen, Y., Tsuji, N., Guan, S. (2020). Microstructural evolution and mechanical properties of nanostructured Cu/Ni multilayer fabricated by accumulative roll bonding. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 152956. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152956>
- Nayak, B. K., Elchidana, P., Mohapatra, R., Sahu, P. K. (2016). Optimization of Coating Process by Using Design of Experiment and Thermodynamic Environment Equivalency Factor. *Asian Journal of Chemistry*, 28 (7), 1589–1594. doi: <https://doi.org/10.14233/ajchem.2016.19764>
- Sobol', O. V., Andreev, A. A., Gorban', V. F., Stolbovoy, V. A., Melekhov, 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>
- Byeon, S. S., Wang, K., Seo, Y. J., Jung, Y. G., Koo, B. H. (2012). Structural properties of the oxide coatings prepared by electrolyte plasma process on the Al 2021 alloy in various nitrogen solutions. *Ceramics International*, 38, S665–S668. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.131>
- Subbotina, V. V., Sobol, O. V., Belozorov, 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)
- Dunleavy, C. S., Golosnoy, I. O., Curran, J. A., Clyne, T. W. (2009). Characterisation of discharge events during plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 203 (22), 3410–3419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.004>
- 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>
- Dunleavy, C. S., Curran, J. A., Clyne, T. W. (2013). Time dependent statistics of plasma discharge parameters during bulk AC plasma

- electrolytic oxidation of aluminium. *Applied Surface Science*, 268, 397–409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.12.109>
24. Nominé, A., Troughton, S. C., Nominé, A. V., Henrion, G., Clyne, T. W. (2015). High speed video evidence for localised discharge cascades during plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 269, 125–130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.043>
 25. Arrabal, R., Matyukina, E., Hashimoto, T., Skeldon, P., Thompson, G. E. (2009). Characterization of AC PEO coatings on magnesium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 203 (16), 2207–2220. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.02.011>
 26. Belozero, V., Mahatlova, 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>
 27. 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 α -Al₂O₃ 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>
 28. Yuting, D., Zhiyang, L., Guofeng, M. (2020). The research progress on micro-arc oxidation of aluminum alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 729, 012055. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/729/1/012055>
 29. Durdu, S., Bayramoğlu, S., Demirtaş, A., Usta, M., Üçişik, A. H. (2013). Characterization of AZ31 Mg Alloy coated by plasma electrolytic oxidation. *Vacuum*, 88, 130–133. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.01.009>
 30. 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 anodecathode micro arc oxidation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (91)), 43–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121744>
 31. 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>
 32. Morais, P. J., Gomes, B., Santos, P., Gomes, M., Gradinger, R., Schnall, M. et. al. (2020). Characterisation of a High-Performance Al–Zn–Mg–Cu Alloy Designed for Wire Arc Additive Manufacturing. *Materials*, 13 (7), 1610. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13071610>
 33. Li, J., Li, F., Ma, X., Li, J., Liang, S., Zhang, L. (2018). Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of an ECAPed Al–Zn–Mg–Cu Alloy. *Advanced Engineering Materials*, 20 (9), 1701155. doi: <https://doi.org/10.1002/adem.201701155>
 34. Stemper, L., Mitas, B., Kremmer, T., Otterbach, S., Uggowitz, P. J., Pogatscher, S. (2019). Age-hardening of high pressure die casting AlMg alloys with Zn and combined Zn and Cu additions. *Materials & Design*, 181, 107927. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107927>
 35. Gloria, A., Montanari, R., Richetta, M., Varone, A. (2019). Alloys for Aeronautic Applications: State of the Art and Perspectives. *Metals*, 9 (6), 662. doi: <https://doi.org/10.3390/met9060662>
 36. Fridlyander, I. N. (2004). *Aluminiumevye splavy v aviakraketnoy i yadernoy tekhnike*. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk*, 74 (12), 1076–1081.
 37. Dos Santos, J. F., Staron, P., Fischer, T., Robson, J. D., Kostka, A., Colegrove, P. et. al. (2018). Understanding precipitate evolution during friction stir welding of Al–Zn–Mg–Cu alloy through in-situ measurement coupled with simulation. *Acta Materialia*, 148, 163–172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.020>
 38. Suminov, I. V., Epel'fel'd, A. V., Lyudin, V. B., Borisov, A. M., Krit, B. L. (2001). Mikrodugovoe oksidirovanie (obzor). *Pribery*, 9, 13–23.
 39. Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, 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>
 40. 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 α -Al₂O₃ 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>
 41. 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>
 42. Klopotov, A. A., Abzaev, Yu. A., Potekaev, A. I., Volokitin, O. G. (2012). *Osnovy rentgenostrukturnogo analiza v materialovedenii*. Tomsk: Izd-vo TGASU, 275.
 43. 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: Tehnosfera, 512.
 44. Loyola, C., Menéndez-Proupin, E., Gutiérrez, G. (2010). Atomistic study of vibrational properties of γ -Al₂O₃. *Journal of Materials Science*, 45 (18), 5094–5100. doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4477-5>
 45. Prins, R. (2019). Positionen von Spinellfehlstellen in γ -Al₂O₃. *Angewandte Chemie*, 131 (43), 15694–15698. doi: <https://doi.org/10.1002/ange.201901497>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218355

INVESTIGATION OF THE ANODIC BEHAVIOR OF W-BASED SUPERALLOY FOR ELECTROCHEMICAL SELECTIVE TREATMENT (p. 61–66)

Vadym Kovalenko

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

Valeriy Kotok

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

W-based superalloys are widely used as elements of drilling equipment, high-speed steel cutting tools, or penetrators for armor-piercing munitions. Used or broken superalloy products are valuable waste that can be recycled to recover valuable components. The most economically and technologically viable method for recycling superalloy scrap is a selective treatment with the dissolution of the binder metal and the production of non-oxidized tungsten powder. The aim of this work was to determine the possibility of anodic treatment of the VNZh90 superalloy scrap with the selective dissolution of the binder metal. The anodic behavior of the VNZh90 superalloy (5 % Ni, 5 % Fe, 90 % W) in HCl solutions with a concentration (wt %) of 9, 13, 17, and 30 was studied by voltammetry. It was shown that the anodic polarization curves of the alloy contained two dissolution peaks on a fresh surface (Fe and Ni components of the binder metal) with a further decrease in the current density. The effect of significant passivation of the VNZh90 alloy was revealed: repeated polarization curves in a 9 % HCL solution contained only the Ni dissolution peak with a 6-fold reduced current density. The passivation of the VNZh90 alloy was explained by the depletion of the surface due to the dissolution of the active Fe component and the Ni passivation due to the W dissolution during the formation of a superalloy. An increase in the HCl concentration did not reveal an activating effect. It was found that there was

no activation effect when FeCl_3 was added to the electrolyte. The introduction of NaCl showed a high activation effect, and the dissolution current density of the passivated Ni component increased by 1.69 times. The efficiency of selective dissolution of the binder metal of the highly passive VNZh90 alloy must be confirmed by the galvanostatic or volt-static method.

Keywords: superalloy, passivation, anodic behavior, tungsten, nickel, iron, selective anodic dissolution.

References

- Ciesla, M., Manka, M., Gradon, P., Binczyk, F. (2014). Impact of a Structure on Durability of Modified Nickel-Base Superalloys in Creep Conditions/Wpływ Struktury Na Trwałość W Warunkach Pełzania Modyfikowanych Nadstopów Na Bazie Niklu. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59 (4), 1559–1563. doi: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0264>
- Masoumi, F., Shahriari, D., Jahazi, M., Cormier, J., Devaux, A. (2016). Kinetics and Mechanisms of γ' Reprecipitation in a Ni-based Superalloy. *Scientific Reports*, 6 (1). doi: <https://doi.org/10.1038/srep28650>
- Lin, Y. C., Li, L., He, D.-G., Chen, M.-S., Liu, G.-Q. (2017). Effects of pre-treatments on mechanical properties and fracture mechanism of a nickel-based superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 679, 401–409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.058>
- Faga, M. G., Mattioda, R., Settineri, L. (2010). Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools. *CIRP Annals*, 59 (1), 133–136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.052>
- Lee, J., Kim, E., Kim, J.-H., Kim, W., Kim, B.-S., Pandey, B. D. (2011). Recycling of WC-Co hardmetal sludge by a new hydrometallurgical route. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29 (3), 365–371. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.01.003>
- Gaona-Tiburcio, C., Aguilar, L. M. R., Zambrano, R. P., Estupiñán, L. F., Cabral, M. J. A., Nieves-Mendoza, D., Castillo-González, E., Almeraya-Calderón, F. (2014). Electrochemical Noise Analysis of Nickel Based Superalloys in Acid Solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 9, 523–533.
- Srivastava, R. R., Kim, M., Lee, J., Jha, M. K., Kim, B.-S. (2014). Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of Materials Science*, 49 (14), 4671–4686. doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8219-y>
- Kovalenko, V., Kotok, V. (2018). Influence of ultrasound and template on the properties of nickel hydroxide as an active substance of supercapacitors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (93)), 32–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133548>
- 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>
- 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>
- Jović, V. D., Jović, B. M., Pavlović, M. G. (2006). Electrodeposition of Ni, Co and Ni-Co alloy powders. *Electrochimica Acta*, 51 (25), 5468–5477. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.02.022>
- Kuznetsova, O. G., Levin, A. M., Sevostyanov, M. A., Bolshih, A. O. (2019). Electrochemical recycling of nickel-cobalt-containing tungsten alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 525, 012088. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/525/1/012088>
- Kovalenko, V., Kotok, V., Vlasov, S. (2018). Definition of synthesis parameters of ultrafine nickel powder by direct electrolysis for application in superalloy production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (91)), 27–33. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121595>
- Kovalenko, V., Kotok, V., Vlasov, S. (2018). Development of the electrochemical synthesis method of ultrafine cobalt powder for a superalloy production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (6 (92)), 41–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126928>
- 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>
- Vlasova, E., Kovalenko, V., Kotok, V., Vlasov, S. (2016). Research of the mechanism of formation and properties of tripolyphosphate coating on the steel basis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (83)), 33–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79559>
- Xing, W., Fan, X., Dong, H., Wu, Y., Fu, G., Liu, Y. (2013). Regeneration technology and progress of waste superalloy. *Chinese Journal of Rare Metals*, 37 (3), 494–500. doi: <http://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7076.2013.03.025>
- Srivastava, R. R., Kim, M., Lee, J. (2016). Novel Aqueous Processing of the Reverted Turbine-Blade Superalloy for Rhenium Recovery. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55 (29), 8191–8199. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00778>
- Yagi, R., Okabe, T. H. (2016). Recovery of Nickel from Nickel-Based Superalloy Scraps by Utilizing Molten Zinc. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48 (1), 335–345. doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0854-z>
- Wu, J., Su, T., Liu, G., Luo, M. (2016). Controlled potential for selectively dissolving nickel-based superalloy wastes containing rhenium element. *Xiyou Jinshu/Chinese Journal of Rare Metals*. doi: <http://doi.org/10.13373/j.cnki.cjrm.2016.07.016>
- Kovalenko, V., Kotok, V. (2017). Selective anodic treatment of W(WC)-based superalloy scrap. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (85)), 53–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91205>
- Kuznetsova, O. G., Levin, A. M., Sevast'yanov, M. A., Tsybin, O. I., Bol'shikh, A. O. (2019). Electrochemical Oxidation of a Heavy Tungsten-Containing VNZh-Type Alloy and Its Components in Ammonia-Alkali Electrolytes. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019 (5), 507–510. doi: <https://doi.org/10.1134/s0036029519050057>
- Kuznetsova, O. G., Levin, A. M., Sevostyanov, M. A., Tsybin, O. I., Bolshikh, A. O. (2020). Changes in electrochemical properties of a heavy tungsten alloy during its processing under the influence of DC current in ammonia-alkali solutions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 848, 012045. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/848/1/012045>
- Kuznetsova, O. G., Levin, A. M., Sevostyanov, M. A., Tsybin, O. I., Bolshikh, A. O. (2020). AC electrochemical oxidation of nickel and VNZh alloy in alkaline-ammonium solutions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 848, 012046. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/848/1/012046>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218291

ESTIMATION OF THE EFFECT OF REDOX TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND TENDENCY TO BRITTLE FRACTURE OF ANODE MATERIALS OF YSZ-NiO(Ni) SYSTEM (p. 67–77)

Bogdan Vasylyv

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine,
Lviv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8827-0747>

Volodymyr Kulyk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5999-3551>

Zoia-Duriagina

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
 The John Paul II Catholic University of Lublin, Lublin, Poland
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2585-3849>

Dariusz Mierzwiński

Cracow University of Technology, Cracow, Poland
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2292-3546>

Taras Kovbasiuk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2792-0555>

Tetiana Tepla

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0474-7975>

The effect of reduction treatment in a high-temperature (600 °C) hydrogen-containing environment on the microstructure and tendency to brittle fracture of YSZ–NiO(Ni) materials for solid oxide fuel cell anodes has been studied. To assess the crack growth resistance of the ceramics, the Vickers indentation technique was adapted, which allowed estimating the microhardness and fracture toughness of the material in the complex.

The requirements for high porosity of the anodes to ensure functional properties show that the strength may be an insufficient characteristic of the bearing capacity of the anode. More structurally sensitive characteristics are needed to assess its crack growth resistance.

The average levels of microhardness of YSZ–NiO ceramics in the as-sintered state and YSZ–NiO(Ni) cermets (2.0 GPa and 0.8 GPa, respectively) and their fracture toughness (3.75 MPa·m^{1/2} and 2.9 MPa·m^{1/2}, respectively) were experimentally determined.

It was found that the microstructure of YSZ–NiO(Ni) cermet after redox treatment is formed by a YSZ ceramic skeleton with refined Ni-phase grains combined in a network, which provides increased electrical conductivity. Along with higher porosity of the cermet, its fracture toughness is not lower than that of the one-time reduced cermet due to the implementation of the bridging toughening mechanism of fracture.

The proposed treatment method allowed forming the microstructure of the anode material, resistant to crack propagation under mechanical load. The propensity of the anode material to brittle fracture on the basis of evaluation of its crack growth resistance and analysis of the microstructure and fracture micromechanism was substantiated. This result is interesting from a theoretical point of view. From a practical point of view, the developed technique allows determining the conditions of redox treatment in the technology of manufacturing fuel cell anodes.

Keywords: YSZ–NiO ceramics, redox treatment, indentation, fracture toughness, fracture mechanism.

References

- Zhu, W. Z., Deevi, S. C. (2003). A review on the status of anode materials for solid oxide fuel cells. *Materials Science and Engineering: A*, 362 (1-2), 228–239. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00620-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00620-8)
- Vasylyv, B. D. (2010). Improvement of the electric conductivity of the material of anode in a fuel cell by the cyclic redox thermal treatment. *Materials Science*, 46 (2), 260–264. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-010-9282-4>
- Podhurska, V., Vasylyv, B. (2012). Influence of NiO reduction on microstructure and properties of porous Ni-ZrO₂ substrates. 2012 IEEE International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering (OMEE), 293–294. doi: <https://doi.org/10.1109/omee.2012.6464761>
- Faes, A., Hessler-Wyser, A., Zryd, A., Van herle J. (2012). A Review of RedOx Cycling of Solid Oxide Fuel Cells Anode. *Membranes*, 2 (3), 585–664. doi: <https://doi.org/10.3390/membranes2030585>
- Danilenko, I., Lasko, G., Brykhanova, I., Burkhovetski, V., Ahkhovetsov, L. (2017). The Peculiarities of Structure Formation and Properties of Zirconia-Based Nanocomposites with Addition of Al₂O₃ and NiO. *Nanoscale Research Letters*, 12 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1901-7>
- Radovic, M., Lara-Curzio, E. (2004). Mechanical properties of tape cast nickel-based anode materials for solid oxide fuel cells before and after reduction in hydrogen. *Acta Materialia*, 52 (20), 5747–5756. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.08.023>
- Pihlatie, M., Kaiser, A., Mogensen, M. (2009). Mechanical properties of NiO/Ni–YSZ composites depending on temperature, porosity and redox cycling. *Journal of the European Ceramic Society*, 29 (9), 1657–1664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.10.017>
- ASTM E384-11. Standard test method for Knoop and Vickers hardness of materials. ASTM International. doi: <http://doi.org/10.1520/E0384-11>
- ASTM C1327-03. Standard test method for Vickers indentation hardness of advanced ceramics. ASTM International. doi: <http://doi.org/10.1520/C1327-03>
- Lawn, B. R., Swain, M. V. (1975). Microfracture beneath point indentations in brittle solids. *Journal of Materials Science*, 10 (1), 113–122. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00541038>
- Lawn, B. R., Fuller, E. R. (1975). Equilibrium penny-like cracks in indentation fracture. *Journal of Materials Science*, 10 (12), 2016–2024. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00557479>
- Evans, A. G., Charles, E. A. (1976). Fracture Toughness Determinations by Indentation. *Journal of the American Ceramic Society*, 59 (7-8), 371–372. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1976.tb10991.x>
- Tanaka, K. (1987). Elastic/plastic indentation hardness and indentation fracture toughness: The inclusion core model. *Journal of Materials Science*, 22 (4), 1501–1508. doi: <https://doi.org/10.1007/bf01233154>
- Niihara, K., Morena, R., Hasselman, D. P. H. (1982). Evaluation of K_{IC} of brittle solids by the indentation method with low crack-to-indent ratios. *Journal of Materials Science Letters*, 1 (1), 13–16. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00724706>
- Niihara, K. (1983). A fracture mechanics analysis of indentation-induced Palmqvist crack in ceramics. *Journal of Materials Science Letters*, 2 (5), 221–223. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00725625>
- Danilenko, I., Glazunov, F., Konstantinova, T., Yashchishyn, I., Burkhovetski, V., Volkova, G. (2014). Effect Of Ni/NiO Particles On Structure And Crack Propagation In Zirconia Based Composites. *Advanced Materials Letters*, 5 (8), 465–471. doi: <https://doi.org/10.5185/amlett.2014.amwc1040ii>
- Grigoriev, O. N., Vinokurov, V. B., Mosina, T. V., Melakh, L. M., Bega, N. D., Koroteev, A. V. et al. (2017). Kinetics of Shrinkage, Structurization, and the Mechanical Characteristics of Zirconium Boride Sintered in the Presence of Activating Additives. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 55 (11-12), 676–688. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9855-y>
- Gogotsi, G. A., Dub, S. N., Lomonova, E. E., Ozersky, B. I. (1995). Vickers and Knoop indentation behaviour of cubic and partially stabilized zirconia crystals. *Journal of the European Ceramic Society*, 15 (5), 405–413. doi: [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(95\)91431-m](https://doi.org/10.1016/0955-2219(95)91431-m)
- Ostash, O. P., Kulyk, V. V., Lenkovskiy, T. M., Duriagina, Z. A., Vira, V. V., Tepla, T. L. (2018). Relationships between the fatigue crack growth resistance characteristics of a steel and the tread surface damage of railway wheel. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2 (90), 49–55. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.0662>
- Aswad, M. A. (2014). Comparison of the fracture toughness of high temperature ceramic measured by digital image correlation and indentation method. *Journal of University of Babylon*, 22 (4), 927–937. Available at: <https://www.iasj.net/iasj?func=article&id=99010>

21. Anstis, G. R., Chantikul, P., Lawn, B. R., Marshall, D. B. (1981). A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements. *Journal of the American Ceramic Society*, 64 (9), 533–538. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1981.tb10320.x>
22. Lawn, B. R., Evans, A. G., Marshall, D. B. (1980). Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System. *Journal of the American Ceramic Society*, 63 (9-10), 574–581. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1980.tb10768.x>
23. Blendell, J. E. (1979). *The Origins of Internal Stresses in Polycrystalline Alumina and Their Effects on Mechanical Properties*. MIT Press.
24. Lankford, J. (1982). Indentation microfracture in the Palmqvist crack regime: implications for fracture toughness evaluation by the indentation method. *Journal of Materials Science Letters*, 1 (11), 493–495. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00721938>
25. Podhurska, V., Vasylyv, B., Ostash, O., Brodnikovskiy, Y., Vasylyev, O. (2016). Influence of Treatment Temperature on Microstructure and Properties of YSZ–NiO Anode Materials. *Nanoscale Research Letters*, 11 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1306-z>
26. Waldbillig, D., Wood, A., Ivey, D. G. (2005). Electrochemical and microstructural characterization of the redox tolerance of solid oxide fuel cell anodes. *Journal of Power Sources*, 145 (2), 206–215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.071>
27. Vasylyv, B. D., Podhurska, V. Y., Ostash, O. P., Vira, V. V. (2018). Effect of a Hydrogen Sulfide-Containing Atmosphere on the Physical and Mechanical Properties of Solid Oxide Fuel Cell Materials. *Springer Proceedings in Physics*, 475–485. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92567-7_30
28. Ropyak, L. Ya., Makoviichuk, M. V., Shatskyi, I. P., Pritula, I. M., Gryn, L. O., Belyakovskiy, V. O. (2020). Stressed state of laminated interference-absorption filter under local loading. *Functional Materials*, 27 (3), 638–642. doi: <https://doi.org/10.15407/fm27.03.638>
29. Adams, J. W., Ruh, R., Mazdiyasi, K. S. (1997). Young's modulus, flexural strength, and fracture of yttria-stabilized zirconia versus temperature. *Journal of the American Ceramic Society*, 80 (4), 903–908. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1997.tb02920.x>
30. Lawn, B. (1993). *Fracture of Brittle Solids*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511623127>
31. Peng, Z., Gong, J., Miao, H. (2004). On the description of indentation size effect in hardness testing for ceramics: Analysis of the nanoindentation data. *Journal of the European Ceramic Society*, 24 (8), 2193–2201. doi: [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(03\)00641-1](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(03)00641-1)
32. Gere, J. M., Timoshenko, S. P. (1997). *Mechanics of Materials*. Boston: PWS Publishing Company.
33. Ivasenko, I. B., Posuvailo, V. M., Klapkiv, M. D., Vynar, V. A., Ostap'yuk, S. I. (2009). Express method for determining the presence of defects of the surface of oxide-ceramic coatings. *Materials Science*, 45 (3), 460–464. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9191-6>
34. Cherepova, T. S., Dmytrieva, H. P., Dukhota, O. I., Kindrachuk, M. V. (2016). Properties of Nickel Powder Alloys Hardened with Titanium Carbide. *Materials Science*, 52 (2), 173–179. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9940-2>
35. Spiridonova, I. M., Sukhovaya, E. V., Pilyaeva, S. B., Bezrukavaya, O. G. (2002). The use of composite coatings during metallurgical equipment parts repair. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, 3, 58–61. Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0036961003&origin=resultslst>
36. Ropyak, L. Y., Shatskyi, I. P., Makoviichuk, M. V. (2017). Influence of the Oxide-Layer Thickness on the Ceramic-Aluminium Coating Resistance to Indentation. *Metallfizika i noveishie tekhnologii*, 39 (4), 517–524. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.04.0517>
37. Shimada, M., Matsushita, K., Kuratani, S., Okamoto, T., Koizumi, M., Tsukuma, K., Tsukidate, T. (1984). Temperature dependence of Young's modulus and internal friction in alumina, silicon nitride, and partially-stabilized zirconia ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 67 (2), C-23–C-24. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1984.tb09612.x>
38. Cook, R. F., Pharr, G. M. (1990). Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 73 (4), 787–817. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05119.x>
39. Nastic, A., Merati, A., Bielawski, M., Bolduc, M., Fakolujo, O., Nganbe, M. (2015). Instrumented and Vickers Indentation for the Characterization of Stiffness, Hardness and Toughness of Zirconia Toughened Al₂O₃ and SiC Armor. *Journal of Materials Science & Technology*, 31 (8), 773–783. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.06.005>
40. Khajavi, P., Hendriksen, P. V., Chevalier, J., Gremillard, L., Frandsen, H. L. (2020). Improving the fracture toughness of stabilized zirconia-based solid oxide cells fuel electrode supports: Effects of type and concentration of stabilizer(s). *Journal of the European Ceramic Society*, 40 (15), 5670–5682. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.05.042>
41. Faes, A., Nakajo, A., Hessler-Wyser, A., Dubois, D., Brisse, A., Modena, S., Van herle Jan. (2009). RedOx study of anode-supported solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 193 (1), 55–64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.118>
42. Railsback, J. G., Johnston-Peck, A. C., Wang, J., Tracy, J. B. (2010). Size-Dependent Nanoscale Kirkendall Effect During the Oxidation of Nickel Nanoparticles. *ACS Nano*, 4 (4), 1913–1920. doi: <https://doi.org/10.1021/nn901736y>
43. Kharchenko, Y., Blikharsky, Z., Vira, V., Vasylyv, B., Podhurska, V. (2020). Study of nanostructural changes in a Ni-containing cermet material during reduction and oxidation at 600 °C. *Applied Nanoscience*, 10 (12), 4535–4543. doi: <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01391-1>
44. Sung Oh, T., Cannon, R. M., Ritchie, R. O. (1987). Subcritical Crack Growth along Ceramic-Metal Interfaces. *Journal of the American Ceramic Society*, 70 (12), C-352–C-355. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1987.tb04917.x>
45. Sukhova, O. V. (2009). Influence of mechanisms of structure formation of interfaces in composites on their properties. *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*, 31 (7), 1001–1012. Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-77952610806&origin=resultslst>
46. Ostash, O. P., Anofriev, V. H., Andreiko, I. M., Muradyan, L. A., Kulyk, V. V. (2013). On the concept of selection of steels for high-strength railroad wheels. *Materials Science*, 48 (6), 697–703. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9557-7>
47. Ritchie, R. O. (1999). Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. *International Journal of Fracture*, 100, 55–83. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1018655917051>
48. Shabri, H. A., Othman, M. H. D., Mohamed, M. A., Kurniawan, T. A., Jamil, S. M. (2021). Recent progress in metal-ceramic anode of solid oxide fuel cell for direct hydrocarbon fuel utilization: A review. *Fuel Processing Technology*, 212, 106626. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106626>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.215163

FAILURE ANALYSIS OF GEOTHERMAL PERFORATED CASING TUBING IN H₂S AND O₂ CONTAINING ENVIRONMENT (p. 78–85)

Harris Prabowo

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI-Depok, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9647-7115>

Yudha Pratesa

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI-Depok, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2929-7963>

Askin Tohari

PT Pertamina Geothermal Energy, Jakarta, Indonesia, 1011
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8482-938X>

Ali Mudakir

PT Elnusa, Jakarta, Indonesia, 12560
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8313-0983>

Badrul Munir

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI-Depok, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8541-6499>

Johny W. Soedarsono

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI-Depok, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6051-2866>

A failure incident occurred on perforated casing tubing for geothermal wells. The damage happened during the drilling process by an air drilling technique after eleven days from the installation. Even though air drilling is a common method for geothermal drilling, this incident showed a lesson to learn to prevent a similar accident in the future. Failure analysis based on the laboratory and field observation was done to get the failure incident's root cause. The visual identification result showed a severe depletion and cracks in the tubing at a depth of 1,450–1,500 m. Optical emission spectroscopy and the tensile test showed materials appropriateness to the specifications. The corrosion attacked from the outer side of the tube. This tubing was exposed to an environment with significant H₂S, CO₂, water steam, and oxygen from the air drilling process. The results of X-ray diffraction analysis (XRD) showed FeS and Fe₃O₄ in the corrosion product. Both of the scale formed as a different layer, where the FeS is formed below the Fe₃O₄ layer. The energy dispersive spectroscopy (EDS) results revealed that each tubing's sulfur content gets an increase in the deeper location. The gas sampling result showed that H₂S gas is more dominant than CO₂ gas, which showed the sour service condition. Corrosion rate calculation modeling was also performed based on the environment parameter; the result is lower than the real cases. The oxygen from air drilling also accelerates the corrosion rate as it acted as an oxidizing agent in the process. Free sulfur is possibly formed, which is possibly transformed into sulfuric acid. This study showed the lesson learn about the deadly combination of sulfur, oxygen, H₂S, and CO₂, making a severe corrosion rate in the perforated tubing.

Keywords: corrosion, H₂S, air drilling, failure, tubing, failure analysis, carbon steel.

References

- Teodoriu, C. (2015). Why and When Does Casing Fail in Geothermal Wells: a Surprising Question? Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne. Available at: <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/21041.pdf>
- Nogara, J., Zarrouk, S. J. (2018). Corrosion in geothermal environment Part 2: Metals and alloys. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 1347–1363. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.091>
- Seiersten, M., Nyborg, R. (2016). Modelling CO₂ Corrosion in Geothermal Systems. Proceedings of the Eurocorr. Available at: <http://eurocorr.efceweb.org/2016/abstracts/WS%20C/67987.pdf>
- Lyons, W. C., Stanley, J. H., Sinisterra, F. J., Weller, T. (2020). Air and Gas Drilling Manual: Applications for Oil, Gas, Geothermal Fluid Recovery Wells, Specialized Construction Boreholes, and the History and Advent of the Directional DTH. Gulf Professional Publishing, 560. doi: <https://doi.org/10.1016/c2017-0-02316-9>
- Zhong, X., Wang, Y., Liang, J., Chen, L., Song, X. (2018). The Coupling Effect of O₂ and H₂S on the Corrosion of G20 Steel in a Simulating Environment of Flue Gas Injection in the Xinjiang Oil Field. Materials, 11 (9), 1635. doi: <https://doi.org/10.3390/ma11091635>
- Hua, Y., Barker, R., Neville, A. (2015). Understanding the Influence of SO₂ and O₂ on the Corrosion of Carbon Steel in Water-Saturated Supercritical CO₂. CORROSION, 71 (5), 667–683. doi: <https://doi.org/10.5006/1504>
- Hua, Y., Barker, R., Bermperidis, G., Zhao, H., Zhang, L., Neville, A. (2016). Comparison of corrosion behavior of X65, 1Cr, 5Cr and 13Cr steels in water-containing supercritical CO₂ environments with SO₂/O₂. Proceedings of Corrosion 2016. Vancouver. Available at: https://eprints.whiterose.ac.uk/101194/3/NACE_2016_FINAL.pdf
- Kermani, M. B., Morshed, A. (2003). Carbon Dioxide Corrosion in Oil and Gas Production – A Compendium. CORROSION, 59 (8), 659–683. doi: <https://doi.org/10.5006/1.3277596>
- Kermani, B., Martin, J. W., Esaklul, K. A. (2006). Materials design strategy: effects of H₂S/CO₂ corrosion on materials selection. CORROSION 2006. NACE International.
- Iannuzzi, M. (2011). Environmentally assisted cracking (EAC) in oil and gas production. Stress Corrosion Cracking, 570–607. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857093769.4.570>
- Sardisco, J. B., Pitts, R. E. (1965). Corrosion of Iron in an H₂S-CO₂-H₂O System Mechanism of Sulfide Film Formation and Kinetics of Corrosion Reaction. CORROSION, 21 (8), 245–253. doi: <https://doi.org/10.5006/0010-9312-21.8.245>
- Shi, F., Zhang, L., Yang, J., Lu, M., Ding, J., Li, H. (2016). Polymorphous FeS corrosion products of pipeline steel under highly sour conditions. Corrosion Science, 102, 103–113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.09.024>
- Deffo Ayagou, M. D., Joshi, G. R., Mai Tran, T. T., Tribollet, B., Sutter, E., Mendibide, C. et. al. (2020). Impact of oxygen contamination on the electrochemical impedance spectroscopy of iron corrosion in H₂S solutions. Corrosion Science, 164, 108302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108302>
- Song, Y., Palencsár, A., Svenningsen, G., Kvarekvål, J., Hemmingen, T. (2012). Effect of O₂ and Temperature on Sour Corrosion. CORROSION, 68 (7), 662–671. doi: <https://doi.org/10.5006/0341>
- Fang, H., Young, D., Nescic, S. (2008). Corrosion of mild steel in the presence of elemental sulfur. NACE - International Corrosion Conference Series. Available at: <http://www.icmt.ohio.edu/documents/publications/8172.pdf>
- Xiang, Y., Wang, Z., Xu, C., Zhou, C., Li, Z., Ni, W. (2011). Impact of SO₂ concentration on the corrosion rate of X70 steel and iron in water-saturated supercritical CO₂ mixed with SO₂. The Journal of Supercritical Fluids, 58 (2), 286–294. doi: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.06.007>
- Xiang, Y., Wang, Z., Li, Z., Ni, W. D. (2013). Effect of temperature on corrosion behaviour of X70 steel in high pressure CO₂/SO₂/O₂/H₂O environments. Corrosion Engineering, Science and Technology, 48 (2), 121–129. doi: <https://doi.org/10.1179/1743278212y.0000000050>
- Hua, Y., Barker, R., Neville, A. (2015). The influence of SO₂ on the tolerable water content to avoid pipeline corrosion during the transportation of supercritical CO₂. International Journal of Greenhouse Gas Control, 37, 412–423. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.03.031>
- Sun, C., Sun, J., Wang, Y., Lin, X., Li, X., Cheng, X., Liu, H. (2016). Synergistic effect of O₂, H₂S and SO₂ impurities on the corrosion behavior of X65 steel in water-saturated supercritical CO₂ system. Corrosion Science, 107, 193–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.02.032>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217819

РОЗРОБКА ПРИПОЮ ДЛЯ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДУ Ni_3Al (с. 6–19)

В. В. Квасницький, В. М. Коржик, В. Ф. Квасницький, Г. П. Мяльниця, Чуньлін Дун, Т. В. Прядко, М. В. Матвієнко, Є. А. Бугурля

Одним з найбільш перспективних конструкційних матеріалів газотурбобудування є сплави з рівновісною та направленою стовбчастою структурою на основі інтерметаліду типу Ni_3Al . Ці матеріали дозволяють підвищити робочу температуру лопаток до 1220 °С. Лопатки виготовляють методом точного лиття в вакуумі, але при цьому необхідні технологічні з'єднання соплових лопаток у блоки, заробка знакових отворів охолоджуваних лопаток, виправлення дефектів лиття.

Зварювання плавленням інтерметаллідних матеріалів, як і інших ливарних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС), не дає позитивних результатів. Тому широко застосовуються різні способи паяння, відомі як TLP-Bonding (Transient Liquid Phase Bonding). Припої за своєю суттю мають температуру плавлення нижче, ніж основний метал. Головною проблемою технологій паяння ЖНС нового покоління, що включає і розробку відповідних припоїв, є підвищення фізико-механічних і експлуатаційних властивостей спаяних з'єднань, близьких до властивостей основного металу.

Визначено раціональне легування основи припою і депресанти, критичні температури і поверхневі властивості припоїв, їх хімічний склад, структура та властивості паяних з'єднань, параметри режимів і технологія паяння. Для підвищення стабільності структури і високотемпературної міцності спаяних з'єднань припій легований ренієм і танталом. Механічні випробування паяних з'єднань при температурі 900 °С проводилися в Україні, а при температурі 1100 °С в КНР. Випробування показали, що короткочасна міцність з'єднань сплавів з рівновісною структурою при температурі 1100 °С становить 0,98 від міцності основного металу. Тривала міцність при тій самій температурі відповідає вимогам до міцності основного металу.

Ключові слова: спаяні з'єднання, мікроструктура з'єднань, хімічний склад, короткочасна та тривала міцність, технологія паяння, тантал, реній, бор.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217674

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВТОМНОЇ КОНТАКТНОЇ МІЦНОСТІ ПОВЕРХОНЬ, ЗМІЦНЕНИХ ЦЕМЕНТУВАННЯМ ТА ІОННО-ПЛАЗМОВИМ АЗОТУВАННЯМ AVINIT N (с. 20–27)

О. В. Сагалович, В. В. Попов, В. В. Сагалович, С. Ф. Дуднік, В. І. Богославцев, М. Г. Стадніченко, А. Б. Єдинович

Проведені порівняльні триботехнічні випробування на контактну втомну міцність при терті кочення з проковзуванням поверхонь, зміцнених цементацією і плазмовим азотуванням Авініт N. Зразки після цементації мали товщину зміцненого шару 1,2 мм, а після азотуванням товщина зміцненого шару становила 0,25 мм. Випробування проведені із застосуванням методу акустичної емісії, який надзвичайно чутливий при реєстрації переходу роботи трибосистем від нормального (механохімічного) зносу до початкових руйнувань поверхні втомного характеру.

Проведені випробування показали, що усереднена кількість циклів до початкового руйнування від втоми для зразків, зміцнених за технологією азотування Avinit, вище в 1,82 рази в порівнянні із зразками, зміцненими цементацією. Глибина пошкоджень на поверхні цементованих зразків могла знаходитись в межах від 0,01 до 0,027 мм в залежності від діаметру пошкодження. Для азотованих поверхонь глибина пошкоджень не перевищувала 0,003 мм.

Стійкість до втомного зношування (руйнування) зразків визначалась по випробуванням на базі 1000000 циклів з контактними навантаженнями $\sigma_{\max}=1140$ МПа, характерними для середньонавантажених поверхонь. Результати випробувань показали, що інтегральна багаточиклова стійкість до втомного зношування (руйнування) зразків, зміцнених азотуванням, більш ніж в 10 разів вища, ніж зразків, зміцнених цементацією.

Проведені дослідження свідчать про ефективність використання іонно-плазмових технологій азотування Avinit замість цементування з метою підвищення контактної міцності поверхні деталей. При цьому, слід взяти до уваги такі переваги цієї технології, як збереження розмірів та високої чистоти обробки поверхонь, внаслідок чого відпадає необхідність їх механічної дробки після зміцнення.

Ключові слова: тертя, кочення з проковзуванням поверхонь, контактна втомна міцність, газова цементація, плазмове азотування.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217281

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЛЕГУВАННЯ Si ТА Cr НА ВЛАСТИВОСТІ МАРГАНЦЕВОГО АУСТЕНІТУ НА ОСНОВІ АВ INITIO МОДЕЛЮВАННЯ (с. 28–36)

П. М. Присяжнюк, Л. С. Шлапак, І. М. Сем'яник, В. О. Коцюбинський, Л. Л. Трощук, С. А. Корній, В. І. Артим

Проведено оцінку впливу розчинених Si та Cr на кристалічну структуру, деякі механічні характеристики та стабільність марганцевого аустеніту. Теоретичні дослідження проводили шляхом першопринципних розрахунків у рамках теорії густини

функціоналу (DFT) для аустенітних структур, які було змодельовано у вигляді надграток $2 \times 2 \times 2$ на основі гранецентрованої кубічної ґратки.

Розміщення атомів у модельних надгратках проводили із урахуванням експериментальних результатів аналізу месбауерівського спектру та рентгенівського фазового аналізу дослідних сплавів, що відповідають високомарганцевим сталям. Надгратки, які відображали структуру легованого аустеніту, містили атом С у центральній октаедричній порі, який по відношенню до атомів Si(Cr) та Mn був розташований у першій та другій координаційних сферах, відповідно.

Аналіз результатів розрахунків показує, що розчинення Si та Cr у марганцевому аустеніті приводить до збільшення стабільності аустенітної фази, як за результатами моделювання в рамках DFT, так і за результатами термодинамічного аналізу. При цьому аустенітна фаза переходить в область пластичних матеріалів відповідно до співвідношення між модулями об'ємної пружності та зсуву $\geq 1,75$ (критерій B/G). Визначення густини електронних станів показує, що серед досліджених структур найнижчою кількістю електронів на рівні Фермі, яка свідчить про найвищу електрохімічну стабільність, характеризується марганцевий аустеніт, легований Cr.

Результати проведених досліджень дають підстави для розширення систем легування високомарганцевих сталей шляхом введення значної кількості (до 10 ат. %) Si та Cr, зокрема для нанесення зносо-, ударо-, та корозійностійких покриттів методом електродугового наплавлення.

Ключові слова: високомарганцева сталь, першопринципні розрахунки, месбауерівська спектроскопія, легуючі елементи, зносостійкі покриття.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217297

АНАЛІЗ РОЗМІРІВ КОТУШОК НА ІНДУКЦІЙНІЙ НАГРІВАЛЬНІЙ МАШИНІ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД МІКРОСТРУКТУРИ І РОЗПОДІЛУ ТВЕРДОСТІ В ЯКОСТІ НОВОГО МАТЕРІАЛУ СНАРЯДОСТІЙКИХ СТАЛЕВИХ ЛИСТІВ (с. 37–44)

Helmy Purwanto, Mohammad Tauviquirrahman, Muhammad Dzulfikar, Rifky Ismail, Purnomo, Ahnas Syifauddin

В області оборони і безпеки для самозахисту потрібні балістично стійкі матеріали. Балістично стійкі матеріали повинні витримувати швидкість обертання снаряда і поглинати енергію удару. Для виготовлення снарядостійкого листа необхідно поєднання твердості на поверхні і пластичності на протилежній стороні. Твердість необхідна для витримування швидкості снаряда, пластичність – для зменшення розтріскування, крихкого руйнування і поглинання енергії удару. Метою даного дослідження є визначення впливу форми котушки на мікроструктуру і розподіл твердості на сталевому листі, яке здійснюється шляхом поверхневого зміцнення з використанням індукційної машини. Лист з вуглецевої сталі товщиною 8 мм аустенізується з використанням індукційної нагрівальної машини зі зміною розмірів і форми котушки. Аустенізація поверхні і швидке гартування в масляних середовищах досягають 900°C . Проведено мікроспостереження за загартованими листами і розподілом твердості по їх поперечному перерізу. За результатами спостереження мікроструктури і мікротвердості по Віккерсу зі зміною котушки при діаметрі 5 мм і з кількістю витків 2 і 3, утворені мікроструктури з усіх боків мають мартенситну структуру і однаково твердість по всьому поперечному перерізу, таким чином поверхневе зміцнення не утворюється. Мікроспостереження показали мартенситну структуру на поверхні, а феритові і перлітні структури все ще видно на середній і нижній сторонах з використанням котушок діаметром 8 мм і 2 витків. Максимальна твердість становить 497 HVN на верхній бічній поверхні і 257 HVN на нижній бічній поверхні з використанням котушки діаметром 8 мм і 2 витків. Підвищена твердість на одній з поверхонь листа при збереженні пластичності на протилежній стороні може бути запропонована в якості балістично стійкого листа шляхом подальших досліджень.

Ключові слова: нагрівальний змійовик, індукційна нагрівальна машина, поверхневе зміцнення, розподіл твердості, балістичний матеріал.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217691

ВИЯВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ФАЗОВО-СТРУКТУРНОГО СТАНУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ МІКРОДУГОВИМ ОКСИДУВАННЯМ ВИСОКОМІЦНОГО СПЛАВУ В95 (с. 45–54)

В. В. Субботіна, О. В. Соболев, В. В. Білозеров

Досліджено вплив складу електроліту і режимів електролізу на морфологію поверхні, кінетику росту, фазово-структурний стан і механічні властивості МДО-покриттів на алюмінієвому (з основним елементом легування Zn) сплаві В95. Встановлено можливість формування на сплаві В95 суцільного МДО-покриттям з товщиною базового шару більше 100 мкм і шорсткістю поверхні менше 5 мкм. Дослідження кінетики росту МДО-покриттів на сплаві В95 показало, що найбільша швидкість росту базового шару покриття (біля 0.83 мкм/хв) відбувається в електроліті 1 г/л КОН+6 г/л Na_2SiO_3 . Збільшення відносного змісту силікатної складової (Na_2SiO_3) хоча і дозволяє досягти досить високої швидкості росту покриття, але при цьому швидкість росту базового шару залишається відносно невеликою (0.380.40) мкм/хв. Це робить процес оксидування в цих електролітах менш технологічним. Дослідження фазово-структурного стану базового шару покриття показало, що він має кристалічну структуру, в якій основною фазою є оксид алюмінію $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (9097) %. В якості другої фази формуються кристали $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Зі збільшенням часу процесу в електролітах з найбільшим відносним вмістом лужної складової (1 г/л КОН+6 г/л Na_2SiO_3) відбувається підвищення відносного вмісту найбільш твердої фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (до 5 %). Твердість таких покриттів при тривалості оксидування 180 хвилин досягає 14000 МПа. Таким чином, проведене дослідження показало доцільність

застосування МДО-обробки для сплаву В95, оскільки ця обробка дозволяє значно підвищити твердість поверхні і тим самим гарантувати її високу зносостійкість. Поєднання високої твердості з відносно високою швидкістю росту покриття дозволяють рекомендувати окиснення в електроліті 1 г/л КОН і 6 г/л Na_2SiO_3 як найбільш технологічне для підвищення механічних характеристик поверхні виробів зі сплаву В95.

Ключові слова: мікродугове окиснення, склад електроліту, Al–Zn–Mg–Cu, товщина, фазовий склад, твердість.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218355

ВИВЧЕННЯ АНОДНОЇ ПОВЕДІНКИ ВОЛЬФРАМОВОГО ТВЕРДОГО СПЛАВУ З МЕТОЮ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ СЕЛЕКТИВНОЇ ПЕРЕРОБКИ (с. 61–66)

В. Л. Коваленко, В. А. Коток

Тверді сплави на основі W широко використовуються як елементи бурового устаткування, інструменти швидкісного різання стали, як броньовані сердечники підкаліберних снарядів. Відпрацьовані або зламані вироби із твердих сплавів є коштовним відходом, що підлягає переробці з вилученням коштовних компонентів. Найбільше економічно і технологічно доцільним методом переробки лома твердих сплавів є селективна обробка з розчиненням металу-зв'язки і одержанням не окисленого порошку вольфраму. Метою даної роботи було визначення можливості анодної переробки лома твердого сплаву ВНЖ90 із селективним розчиненням металу-зв'язки. Методом вольтамперометрії вивчено анодне поведінку твердого сплаву ВНЖ90 (5 %Ni, 5 %Fe, 90 % W) у розчинах HCl з концентрацією (мас. %) 9, 13, 17 і 30. Показано, що анодні поляризаційні криві сплаву на свіжій поверхні містять два піки розчинення (Fe і Ni компонентів металу-зв'язки) з подальшим зниженням густини струму. Виявлено ефект істотної пасивації сплаву ВНЖ90: повторні поляризаційні криві в 9 % розчині HCl містять тільки пік розчинення Ni зі зниженою в 6 разів густиною струму. Пасивація сплаву ВНЖ90 пояснюється збідненням поверхні за рахунок розчинення активного Fe компонента і пасивацією Ni за рахунок розчинення W при формуванні твердого сплаву. При збільшенні концентрації HCl не виявило активуючого ефекту. Виявлено відсутність активаційного ефекту при введенні в електроліт добавки FeCl_3 . Введення NaCl показало високий активаційний ефект – густина струму розчинення пасивованого Ni компоненту збільшилася в 1,69 разів. Ефективність селективного розчинення металу-зв'язки високопасивного сплаву ВНЖ90 необхідно підтвердити гальвано- або вольтастатичним методом.

Ключові слова: твердий сплав, пасивація, анодне поведінка, вольфрам, нікель, залізо, анодне селективне розчинення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218291

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ REDOX-ОБРОБКИ НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА СХИЛЬНІСТЬ ДО КРИХКОГО РУЙНУВАННЯ АНОДНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ YSZ–NiO(Ni) (с. 67–77)

Б. Д. Василів, В. В. Кулик, З. А. Дурягіна, Д. Межвінські, Т. М. Ковбасюк, Т. Л. Тепла

Досліджено вплив відновлювальної обробки у високотемпературному (600 °C) воденьмісному середовищі на структуру і схильність до крихкого руйнування матеріалів YSZ–NiO(Ni) для анодів твердооксидних паливних комірок. Для оцінювання опору руйнуванню кераміки адаптовано методику індентування за Вікерсом, що дозволило в комплексі оцінити мікротвердість і в'язкість руйнування матеріалу.

Вимоги щодо високої поруватості анодів для забезпечення функціональних властивостей показують, що міцність може бути недостатньою характеристикою несучої здатності анода. Потрібні структурно-чутливі характеристики для оцінювання його опору руйнуванню.

Експериментально визначено середні рівні мікротвердості кераміки YSZ–NiO у вихідному стані та керметів YSZ–NiO(Ni) (2,0 ГПа і 0,8 ГПа відповідно) і їх в'язкості руйнування (3,75 МПа·м^{1/2} і 2,9 МПа·м^{1/2} відповідно).

Встановлено, що структуру кермету YSZ–NiO(Ni) після redox-обробки формує керамічний каркас YSZ із подрібненими зернами Ni-фази, об'єднаними в мережу, що забезпечує підвищену електропровідність. За вищої поруватості кермету його в'язкість руйнування не нижча за однократно відновленого завдяки реалізації механізму підвищення в'язкості руйнування місткуванням.

Запропонований спосіб обробки дозволив сформувати мікроструктуру анодного матеріалу, тривкого до поширення тріщин під механічним навантаженням. Обґрунтовано схильність матеріалу анода до крихкого руйнування на підставі оцінювання його тріщиностійкості та аналізу мікроструктури й мікромеханізму руйнування. Цей результат є цікавим з теоретичної точки зору. З практичної точки зору розроблена методика дозволяє визначити умови redox-обробки в технології виготовлення анодів паливних комірок.

Ключові слова: кераміка YSZ–NiO, redox-обробка, індентування, в'язкість руйнування, механізм руйнування.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.215163

АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ПЕРФОРОВАНИХ ОБСАДНИХ ТРУБ В СЕРЕДОВИЩІ, ЩО МІСТИТЬ H_2S І O_2 (с. 78–85)

Н. Prabowo, Y. Pratesa, A. Tohari, A. Mudakir, B. Munir, J. Soedarsono

Відбулось пошкодження перфорованих обсадних труб для геотермальних свердловин. Пошкодження сталося в процесі пневмударного буріння через одинадцять днів після установки. Незважаючи на те, що пневмударне буріння є поширеним методом геотермального буріння, даний інцидент показав урок, який необхідно засвоїти для запобігання подібних аварій в

майбутньому. На основі лабораторних та польових спостережень проведено аналіз для встановлення першопричини пошкодження. Результат візуальної ідентифікації показав сильне виснаження і тріщини в трубах на глибині 1450–1500 м. Відповідно до оптичної емісійної спектроскопії та випробування на розтягування, матеріали відповідали технічним вимогам. Корозія настала із зовнішнього боку труби. Ця труба піддавалася впливу навколишнього середовища зі значним вмістом H_2S , CO_2 , водяної пари і кисню в процесі пневмоударного буріння. Результати рентгеноструктурного аналізу (РСА) показали наявність FeS і Fe_3O_4 в продукті корозії. Обидві окалини утворені у вигляді окремого шару, де FeS утворюється нижче шару Fe_3O_4 . Результати енергодисперсійної спектроскопії (ЕДС) показали, що вміст сірки в кожній трубці збільшується в міру поглиблення. За результатами відбору проб, вміст газу H_2S переважає над CO_2 , що свідчить про експлуатацію в кислотних умовах. Проводилося також моделювання швидкості корозії на основі параметра навколишнього середовища; результат виявився нижчим, ніж у реальних випадках. Кисень від пневмоударного буріння також збільшує швидкість корозії, оскільки він діє як окислювач в цьому процесі. Можливе утворення вільної сірки, яка, можливо, перетворюється в сірчану кислоту. Дане дослідження показало, що згубне поєднання сірки, кисню, H_2S і CO_2 викликає сильну корозію в перфорованих трубах.

Ключові слова: корозія, H_2S , пневмоударное буріння, пошкодження, труба, аналіз пошкоджень, вуглецева сталь.