

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.226342

AN ANALYSIS OF $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ DOUBLE PEROVSKITE OXIDE FOR INTERMEDIATE-TEMPERATURE SOLID OXIDE FUEL CELLS (p. 6–14)

Adi Subardi

Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0867-3624>

Iwan Susanto

Politeknik Negeri Jakarta, Kota Depok, Jawa Barat, Indonesia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7120-0374>

Ratna Kartikasari

Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8859-3258>

Tugino Tugino

Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0297-088X>

Hasta Kuntara

Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Depok, Sleman, Indonesia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3518-0692>

Andy Erwin Wijaya

Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Depok, Sleman, Indonesia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3613-3935>

Muhamad Jalu Purnomo

Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, Banguntapan, Kec. Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa, Yogyakarta, Indonesia

Ade Indra

Institut Teknologi Padang (ITP), West Sumatera Barat, Indonesia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3048-4758>

Hendriwan Fahmi

Institut Teknologi Padang (ITP), Kota Padang, Indonesia

Yen-Pei Fu

National Dong Hwa University, Shoufeng Township, Hualien, Taiwan

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2472-4981>

The main obstacle to solid oxide fuel cells (SOFCs) implementation is the high operating temperature in the range of 800–1,000 °C so that it has an impact on high costs. SOFCs work at high temperatures causing rapid breakdown between layers (anode, electrolyte, and cathode) because they have different thermal expansion. The study focused on reducing the operating temperature in the medium temperature range. $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ (SBSC) oxide was studied as a cathode material for IT-SOFCs based on $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.9}$ (SDC) electrolyte. The SBSC powder was prepared using the solid-state reaction method with repeated ball-milling and calcining. Alumina grinding balls are used because they have a high hardness to crush and smooth the powder of SOFC material. The specimens were then tested as cathode material for SOFC at intermediate

temperature (600–800 °C) using X-ray powder diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), electrochemical, and scanning electron microscopy (SEM) tests. The X-ray powder diffraction (XRD) pattern of SBSC powder can be indexed to a tetragonal space group (P4/mmm). The overall change in mass of the SBSC powder is 8 % at a temperature range of 125–800 °C. A sample of SBSC powder showed a high oxygen content (5+ δ) that reached 5.92 and 5.41 at temperatures of 200 °C and 800 °C, respectively. High diffusion levels and increased surface activity of oxygen reduction reactions (ORRs) can be affected by high oxygen content (5+ δ). The polarization resistance (R_p) of samples sintered at 1000 °C is 4.02 Ωcm^2 at 600 °C, 1.04 Ωcm^2 at 700 °C, and 0.42 Ωcm^2 at 800 °C. The power density of the SBSC cathode is 336.1, 387.3, and 357.4 mW/cm^2 at temperatures of 625 °C, 650 °C, and 675 °C, respectively. The SBSC demonstrates as a prospective cathode material for IT-SOFC.

Keywords: solid oxide fuel cell, thermal properties, oxygen content, electrochemical properties, cell performance.

References

1. Steele, B. C. H., Heinzel, A. (2001). Materials for fuel-cell technologies. *Nature*, 414 (6861), 345–352. doi: <https://doi.org/10.1038/35104620>
2. Minh, N. Q. (1993). Ceramic Fuel Cells. *Journal of the American Ceramic Society*, 76 (3), 563–588. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb03645.x>
3. Ruiz-Morales, J. C., Marrero-López, D., Canales-Vázquez, J., Irvine, J. T. S. (2011). Symmetric and reversible solid oxide fuel cells. *RSC Advances*, 1 (8), 1403. doi: <https://doi.org/10.1039/c1ra00284h>
4. Skinner, S. J. (2001). Recent advances in Perovskite-type materials for solid oxide fuel cell cathodes. *International Journal of Inorganic Materials*, 3 (2), 113–121. doi: [https://doi.org/10.1016/s1466-6049\(01\)00004-6](https://doi.org/10.1016/s1466-6049(01)00004-6)
5. Brett, D. J. L., Atkinson, A., Brandon, N. P., Skinner, S. J. (2008). Intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Chemical Society Reviews*, 37 (8), 1568. doi: <https://doi.org/10.1039/b612060c>
6. Susanto, I., Kamal, D. M., Ruswanto, S., Subarkah, R., Zainuri, F., Permana, S. et. al. (2020). Development of cobalt-free oxide ($\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Fe}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$) cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells (IT-SOFCs). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5 (108)), 15–20. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217282>
7. Liu, H., Zhu, X., Cheng, M., Cong, Y., Yang, W. (2011). Novel $\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_4$ spinel cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Chemical Communications*, 47 (8), 2378–2380. doi: <https://doi.org/10.1039/c0cc04300a>
8. Adler, S. B. (2004). Factors Governing Oxygen Reduction in Solid Oxide Fuel Cell Cathodes†. *Chemical Reviews*, 104 (10), 4791–4844. doi: <https://doi.org/10.1021/cr020724o>
9. Takeda, Y., Kanno, R., Noda, M., Tomida, Y., Yamamoto, O. (1987). Cathodic Polarization Phenomena of Perovskite Oxide Electrodes with Stabilized Zirconia. *Journal of The Electrochemical Society*, 134 (11), 2656–2661. doi: <https://doi.org/10.1149/1.2100267>
10. Adler, S. B., Lane, J. A., Steele, B. C. H. (1996). Electrode Kinetics of Porous Mixed-Conducting Oxygen Electrodes. *Journal of*

- The Electrochemical Society, 143 (11), 3554–3564. doi: <https://doi.org/10.1149/1.1837252>
11. Subardi, A., Cheng, M.-H., Fu, Y.-P. (2014). Chemical bulk diffusion and electrochemical properties of $\text{SmBa}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ cathode for intermediate solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (35), 20783–20790. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.134>
 12. Zhao, F., Wang, S., Brinkman, K., Chen, F. (2010). Layered perovskite $\text{PrBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ as high performance cathode for solid oxide fuel cells using oxide proton-conducting electrolyte. *Journal of Power Sources*, 195 (17), 5468–5473. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.03.088>
 13. Zhou, Q., He, T., Ji, Y. (2008). $\text{SmBaCo}_2\text{O}_{5+x}$ double-perovskite structure cathode material for intermediate-temperature solid-oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 185 (2), 754–758. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.07.064>
 14. Tarancón, A., Burriel, M., Santiso, J., Skinner, S. J., Kilner, J. A. (2010). Advances in layered oxide cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Journal of Materials Chemistry*, 20 (19), 3799. doi: <https://doi.org/10.1039/b922430k>
 15. Chen, D., Ran, R., Zhang, K., Wang, J., Shao, Z. (2009). Intermediate-temperature electrochemical performance of a polycrystalline $\text{PrBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ cathode on samarium-doped ceria electrolyte. *Journal of Power Sources*, 188 (1), 96–105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.045>
 16. Kuroda, C., Zheng, K., Świerczek, K. (2013). Characterization of novel $\text{GdBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{FexO}_{5+\delta}$ perovskites for application in IT-SOFC cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (2), 1027–1038. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.085>
 17. Tarancón, A., Morata, A., Dezanneau, G., Skinner, S. J., Kilner, J. A., Estradé, S. et al. (2007). $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+x}$ layered perovskite as an intermediate temperature solid oxide fuel cell cathode. *Journal of Power Sources*, 174 (1), 255–263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.08.077>
 18. Chang, A., Skinner, S., Kilner, J. (2006). Electrical properties of $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+x}$ for ITSOFC applications. *Solid State Ionics*, 177 (19-25), 2009–2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2006.05.047>
 19. Gu, H., Chen, H., Gao, L., Zheng, Y., Zhu, X., Guo, L. (2009). Oxygen reduction mechanism of $\text{NdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells under cathodic polarization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (5), 2416–2420. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.003>
 20. Kong, X., Ding, X. (2011). Novel layered perovskite $\text{SmBaCu}_2\text{O}_{5+\delta}$ as a potential cathode for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (24), 15715–15721. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.035>
 21. Kim, J. H., Kim, Y., Connor, P. A., Irvine, J. T. S., Bae, J., Zhou, W. (2009). Structural, thermal and electrochemical properties of layered perovskite $\text{SmBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$, a potential cathode material for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 194 (2), 704–711. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.024>
 22. Liu, W., Yang, C., Wu, X., Gao, H., Chen, Z. (2011). Oxygen relaxation and phase transition in $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ oxide. *Solid State Ionics*, 192 (1), 245–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.04.028>
 23. Kim, J.-H., Moggi, L., Prado, F., Caneiro, A., Alonso, J. A., Manthiram, A. (2009). High Temperature Crystal Chemistry and Oxygen Permeation Properties of the Mixed Ionic–Electronic Conductors $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ (Ln=Lanthanide). *Journal of The Electrochemical Society*, 156 (12), B1376. doi: <https://doi.org/10.1149/1.3231501>
 24. Subardi, A., Chen, C.-C., Cheng, M.-H., Chang, W.-K., Fu, Y. P. (2016). Electrical, thermal and electrochemical properties of $\text{SmBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ cathode materials for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Electrochimica Acta*, 204, 118–127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.04.069>
 25. Lü, S., Long, G., Meng, X., Ji, Y., Lü, B., Zhao, H. (2012). $\text{PrBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+x}$ as cathode material based on LSGM and GDC electrolyte for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (7), 5914–5919. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.134>
 26. Fu, Y.-P., Wen, S.-B., Lu, C.-H. (2007). Preparation and Characterization of Samaria-Doped Ceria Electrolyte Materials for Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of the American Ceramic Society*, 91 (1), 127–131. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01923.x>
 27. Kuhn, M., Kim, J. J., Bishop, S. R., Tuller, H. L. (2013). Oxygen Nonstoichiometry and Defect Chemistry of Perovskite-Structured $\text{BaxSr}_{1-x}\text{Ti}_{1-y}\text{FeyO}_{3-y/2+\delta}$ Solid Solutions. *Chemistry of Materials*, 25 (15), 2970–2975. doi: <https://doi.org/10.1021/cm400546z>
 28. Fu, Y.-P., Ouyang, J., Li, C.-H., Hu, S.-H. (2013). Chemical bulk diffusion coefficient of $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\delta}$ cathode for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 240, 168–177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.138>
 29. Aksenova, T. V., Gavrilova, L. Y., Yaremchenko, A. A., Cherepanov, V. A., Kharton, V. V. (2010). Oxygen nonstoichiometry, thermal expansion and high-temperature electrical properties of layered $\text{NdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ and $\text{SmBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$. *Materials Research Bulletin*, 45 (9), 1288–1292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2010.05.004>
 30. Zhang, K., Ge, L., Ran, R., Shao, Z., Liu, S. (2008). Synthesis, characterization and evaluation of cation-ordered $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ as materials of oxygen permeation membranes and cathodes of SOFCs. *Acta Materialia*, 56 (17), 4876–4889. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.06.004>
 31. Kim, J., Choi, S., Park, S., Kim, C., Shin, J., Kim, G. (2013). Effect of Mn on the electrochemical properties of a layered perovskite $\text{NdBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{MnxO}_{5+\delta}$ ($x=0, 0.25, \text{ and } 0.5$) for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Electrochimica Acta*, 112, 712–718. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.09.014>
 32. Subardi, A., Fu, Y.-P. (2017). Electrochemical and thermal properties of $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ cathode impregnated with $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.9}$ nanoparticles for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (38), 24338–24346. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.010>
 33. West, M., Manthiram, A. (2013). Layered $\text{LnBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoCuO}_{5+\delta}$ (Ln = Nd and Gd) perovskite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (8), 3364–3372. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.133>
 34. Choi, M.-B., Lee, K.-T., Yoon, H.-S., Jeon, S.-Y., Wachsmann, E. D., Song, S.-J. (2012). Electrochemical properties of ceria-based intermediate temperature solid oxide fuel cell using microwave heat-treated $\text{La}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ as a cathode. *Journal of Power Sources*, 220, 377–382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.122>
 35. Jun, A., Shin, J., Kim, G. (2013). High redox and performance stability of layered $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ perovskite cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15 (45), 19906. doi: <https://doi.org/10.1039/c3cp53883d>
 36. Kostoglouidis, G., Vasilakos, N., Ftikos, Ch. (1998). Crystal structure, thermal and electrical properties of $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$ ($x=0, 0.15, 0.3, 0.4, 0.5$) perovskite oxides. *Solid State Ionics*, 106 (3-4), 207–218. doi: [https://doi.org/10.1016/s0167-2738\(97\)00506-7](https://doi.org/10.1016/s0167-2738(97)00506-7)
 37. Meuffels, P. (2007). Propane gas sensing with high-density $\text{SrTi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{(3-\delta)}$ ceramics evaluated by thermogravimetric analysis.

- Journal of the European Ceramic Society, 27 (1), 285–290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.078>
38. Lia, S., Jin, W., Xu, N., Shi, J. (2001). Mechanical strength, and oxygen and electronic transport properties of SrCo_{0.4}Fe_{0.6}O_{3-δ}-YSZ membranes. *Journal of Membrane Science*, 186 (2), 195–204. doi: [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(00\)00681-5](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(00)00681-5)
 39. Kim, G., Wang, S., Jacobson, A. J., Reimus, L., Brodersen, P., Mims, C. A. (2007). Rapid oxygen ion diffusion and surface exchange kinetics in PrBaCo₂O_{5+x} with a perovskite related structure and ordered A cations. *Journal of Materials Chemistry*, 17 (24), 2500. doi: <https://doi.org/10.1039/b618345j>
 40. Meng, F., Xia, T., Wang, J., Shi, Z., Lian, J., Zhao, H. et. al. (2014). Evaluation of layered perovskites YBa_{1-x}Sr_xCo₂O_{5+δ} as cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (9), 4531–4543. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.008>
 41. Baek, S.-W., Kim, J. H., Bae, J. (2008). Characteristics of ABO₃ and A₂BO₄ (ASm, Sr; BCo, Fe, Ni) samarium oxide system as cathode materials for intermediate temperature-operating solid oxide fuel cell. *Solid State Ionics*, 179 (27-32), 1570–1574. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2007.12.010>
 42. Nam, J. H., Jeon, D. H. (2006). A comprehensive micro-scale model for transport and reaction in intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Electrochimica Acta*, 51 (17), 3446–3460. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.09.041>
 43. Andersson, M., Yuan, J., Sundén, B. (2010). Review on modeling development for multiscale chemical reactions coupled transport phenomena in solid oxide fuel cells. *Applied Energy*, 87 (5), 1461–1476. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.013>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.227224

TENSILE STRENGTH AND THERMAL CYCLE ANALYSIS OF AA6061 FRICTION WELD JOINTS WITH DIFFERENT DIAMETERS AND VARIOUS FRICTION TIMES (p. 15–21)

Yudy Surya Irawan

Brawijaya University, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7593-8931>

Moch Agus Choiron

Brawijaya University, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4052-4832>

Wahyono Suprpto

Brawijaya University, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3510-2448>

The paper reports measurement of tensile strength and the thermal cycle of AA6061 aluminum alloy circular bar friction weld with different diameters and various friction times. A continuous drive friction welding (CDFW) of AA6061 was conducted to weld the AA6061 circular bar with different diameters of 30 mm for the rotating part and 15 mm for the stationary part. The CDFW process was carried out with the revolution speed of 1,600 rpm, the initial compressive force of 2.8 kN during the friction stage for various friction times of 10, 12, and 14 seconds, and an upset force of 28 kN for 60 seconds. The flash temperature was measured using a digital infrared thermometer gun. Computer simulation using the finite element method was also done by coupling transient thermal and static structural methods. The flash temperature becomes higher along with increasing friction time based on the digital infrared thermometer gun measurement and finite element analysis. The

results of tensile strength testing show that the specimen with a friction time of 12 seconds has the highest tensile strength. Based on the hardness testing result, it is found that the specimen with a friction time of 10 seconds has higher hardness, but it has an incomplete joint flash so that the tensile strength is lower than that of the specimen with a friction time of 12 seconds. Besides, the hardness of the specimen with a friction time of 12 seconds is higher than that of the specimen with a friction time of 14 seconds. The flash size becomes bigger along with the increase of the friction time based on the macrostructure observation on the longitudinal section of the CDFW specimen. It is confirmed by the temperature measurement and finite element analysis that the specimen with a friction time of 12 seconds has heat input to form the CDFW joint that has a maximum tensile strength in the range of this study.

Keywords: Aluminum, Friction Welding, Tensile Strength, Finite Element Analysis, Thermal cycle.

References

1. Nicholas, E. D. (2003). Friction Processing Technologies. *Welding in the World*, 47 (11-12), 2–9. doi: <https://doi.org/10.1007/bf03266402>
2. Maalekian, M. (2007). Friction welding – critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12 (8), 738–759. doi: <https://doi.org/10.1179/174329307x249333>
3. Yilbas, B. S., Sahin, A. Z. (2014). Friction welding. Thermal and metallurgical characteristics. Springer, 71. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54607-5>
4. Rajakumar, S., Muralidharan, C., Balasubramanian, V. (2011). Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded AA6061-T6 aluminium alloy joints. *Materials Design*, 32 (5), 2878–2890. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.025>
5. Barnes, T. A., Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part I – solid and liquid phase welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 99 (1-3), 62–71. doi: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(99\)00367-2](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(99)00367-2)
6. Uday, M. B., Ahmad Fauzi, M. N., Zuhailawati, H., Ismail, A. B. (2010). Advances in friction welding process: a review. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15 (7), 534–558. doi: <https://doi.org/10.1179/136217110x12785889550064>
7. Sahin, M., Akata, H. E., Gulmez, T. (2007). Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding. *Materials Characterization*, 58 (10), 1033–1038. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.09.008>
8. Sathiya, P., Aravindan, S., Noorul Haq, A. (2006). Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31 (11-12), 1076–1082. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0285-5>
9. Irawan, Y. S., Wirohardjo, M., Ma'arif, M. S. (2012). Tensile Strength of Weld Joint Produced by Spinning Friction Welding of Round Aluminum A6061 with Various Chamfer Angles. *Advanced Materials Research*, 576, 761–765. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.576.761>
10. Irawan, Y. S., Razaq, F., Suprpto, W., Wardana, B. S. (2019). Tensile strength and fatigue crack growth rate of chamfered and clamped A6061 friction weld joints. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (102)), 31–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154384>
11. Fukakusa, K. (1997). Real rotational contact plane in friction welding of different diameter materials and dissimilar materials: Fun-

damental study of friction welding. *Welding International*, 11 (6), 425–431. doi: <https://doi.org/10.1080/09507119709451991>

12. Erol Akata, H., Sahin, M. (2003). An investigation on the effect of dimensional differences in friction welding of AISI 1040 specimens. *Industrial Lubrication and Tribology*, 55 (5), 223–232. doi: <https://doi.org/10.1108/00368790310488887>
13. Can, A., Sahin, M., Kucuk, M. Thermically Evaluation and Modelling of Friction Welding // *Strojarsstvo*, 2009. Vol. 51 (1) P. 5-13. <https://hrcak.srce.hr/42501>
14. Sahin, M. (2004). Simulation of friction welding using a developed computer program. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 1011–1018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.287>
15. Sahin, M. (2001). Investigation of effects of workpiece dimensions and plastic deformation on friction welding method. Edirne.
16. Stuzalec, A. (1990). Thermal effects in friction welding. *International Journal of Mechanical Sciences*, 32 (6), 467–478. doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(90\)90153-a](https://doi.org/10.1016/0020-7403(90)90153-a)
17. Standard Methods for Mechanical Testing of Welds (7th Edition): (AWS B4.0:2007) (2007). American Welding Society.
18. Academic Ansys 18.1. Ansys Inc. Available at: <https://www.ansys.com>
19. Khan, I. A. (2011). Experimental and numerical investigation on the friction welding process. Jawaharlal Nehru Technological University, 227. Available at: <http://hdl.handle.net/10603/3467>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228161

EFFECT OF WELDING SEQUENCE AND WELDING CURRENT ON DISTORTION, MECHANICAL PROPERTIES AND METALLURGICAL OBSERVATIONS OF ORBITAL PIPE WELDING ON SS 316L (p. 22–31)

Agus Widyianto

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1554-2561>

Ario Sunar Baskoro

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-4196>

Gandjar Kiswanto

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7817-4228>

Muhamad Fathin Ginanjar Ganeswara

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6794-3802>

Orbital pipe welding was often used to manufacture piping systems. In orbital pipe welding, a major challenge is the welding torch's position during the welding process, so that additional methods are needed to overcome these challenges. This paper discusses the influence of welding sequence and welding current on distortion, mechanical properties and metallurgical observations in orbital pipe welding with SS 316L pipe square butt joints. The variation of the orbital pipe welding parameters used is welding current and welding sequence. The welding current used is 100 A, 110 A, and 120 A, while the welding sequence used is one sequence, two sequences, three sequences, and four sequences. The welding results will be analyzed from distortion measurement, mechanical properties test and metallurgical observations. Distortion measurements are made on the pipe before welding and after welding. Testing of mechanical properties includes tensile tests and microhardness tests, while metallurgical observations include macrostructure and microstructural observations. The results show that maximum axial distortion, transverse

distortion, ovality, and taper occurred at a welding current of 120 A with four sequences of 445 μm , 300 μm , 195 μm , and 275 μm , respectively. The decrease in ultimate tensile strength is 51 % compared to the base metal's ultimate tensile strength. Horizontal and vertical microhardness tests show that welding with one sequence produces the greatest microhardness value, but there is a decrease in the microhardness value using welding with two to four sequences. Orbital pipe welding results in different depths of penetration at each pipe position. The largest and smallest depth of penetration was 4.11 mm and 1.60 mm, respectively.

Keywords: welding sequence, orbital pipe welding, gas tungsten arc welding, distortion, SS 316L.

References

1. Panji, M., Baskoro, A. S., Widyianto, A. (2019). Effect of Welding Current and Welding Speed on Weld Geometry and Distortion in TIG Welding of A36 Mild Steel Pipe with V-Groove Joint. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 694, 012026. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/694/1/012026>
2. Eisazadeh, H., Haines, D. J., Torabizadeh, M. (2014). Effects of gravity on mechanical properties of GTA welded joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (5), 1136–1142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.01.002>
3. Tseng, K.-H., Chuang, K.-J. (2012). Application of iron-based powders in tungsten inert gas welding for 17Cr–10Ni–2Mo alloys. *Powder Technology*, 228, 36–46. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.04.047>
4. Tseng, K.-H., Chen, K.-L. (2012). Comparisons Between TiO₂- and SiO₂-Flux Assisted TIG Welding Processes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12 (8), 6359–6367. doi: <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6419>
5. Gill, S. S., Singh, J. (2013). Artificial intelligent modeling to predict tensile strength of inertia friction-welded pipe joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (9-12), 2001–2009. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5177-5>
6. Tsai, C.-H., Hou, K.-H., Chuang, H.-T. (2006). Fuzzy control of pulsed GTA welds by using real-time root bead image feedback. *Journal of Materials Processing Technology*, 176 (1-3), 158–167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.02.027>
7. Sattari-Far, I., Javadi, Y. (2008). Influence of welding sequence on welding distortions in pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85 (4), 265–274. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.07.003>
8. Harris, I. D. (2011). Welding advances in tube and pipe applications. *Welding Journal*, 90 (6), 58–63.
9. Lukkari, J. (2005). Orbital-TIG—a great way to join pipes. *The ESAB Welding and Cutting Journal*, 60 (01), 3–6.
10. Wilsdorf, R., Pistor, R., Sixsmith, J. J., Jin, H. (2006). Welding aluminum pipe and tube with variable polarity. *Welding Journal*, 85 (4), 42–43.
11. Suwanda, T., Soenoko, R., Irawan, Y. S., Choiron, M. A. (2020). Temperature cycle analysis of A6061-AISI304 dissimilar metal continuous drive friction welding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (105)), 38–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203391>
12. Okano, S., Mochizuki, M. (2017). Transient distortion behavior during TIG welding of thin steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 241, 103–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.006>
13. Seyyedean Choobi, M., Haghpanahi, M., Sedighi, M. (2012). Effect of welding sequence and direction on angular distortions in butt-weld-

- ed plates. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 47 (1), 46–54. doi: <https://doi.org/10.1177/0309324711425887>
14. Yi, J., Zhang, J., Cao, S., Guo, P. (2019). Effect of welding sequence on residual stress and deformation of 6061-T6 aluminium alloy automobile component. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29 (2), 287–295. doi: [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(19\)64938-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(19)64938-1)
 15. Baskoro, A. S., Hidayat, R., Widyanto, A., Amat, M. A., Putra, D. U. (2020). Optimization of Gas Metal Arc Welding (GMAW) Parameters for Minimum Distortion of T Welded Joints of A36 Mild Steel by Taguchi Method. *Materials Science Forum*, 1000, 356–363. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1000.356>
 16. Widyanto, A., Baskoro, A. S., Kiswanto, G. (2020). Effect of Pulse Currents on Weld Geometry and Angular Distortion in Pulsed GTAW of 304 Stainless Steel Butt Joint. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17 (1), 7687–7694. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.17.1.2020.16.0571>
 17. Mistry, P. J. (2016). Effect of process parameters on bead geometry and shape relationship of gas metal arc weldments. *International Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering Technology*, 2, 24–27.
 18. Kumar, M. V., Balasubramanian, V. (2014). Microstructure and tensile properties of friction welded SUS 304HCu austenitic stainless steel tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 113, 25–31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.11.005>
 19. Figueirôa, D. W., Pigozzo, I. O., e Silva, R. H. G., de Abreu Santos, T. F., Filho, S. L. U. (2017). Influence of welding position and parameters in orbital tig welding applied to low-carbon steel pipes. *Welding International*, 31 (8), 583–590. doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1218615>
 20. Qi, B. J., Yang, M. X., Cong, B. Q., Liu, F. J. (2013). The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66 (9-12), 1545–1553. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4438-z>
 21. Casalino, G., Angelastro, A., Perulli, P., Casavola, C., Moramarco, V. (2018). Study on the fiber laser/TIG weldability of AISI 304 and AISI 410 dissimilar weld. *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 216–225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.005>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228627

A STUDY OF THE PACK CARBURIZING QUENCHING TREATMENT WITH CANE MOLASSES COOLING MEDIUM EFFECT ON THE WEAR RESISTANCE OF LOW CARBON STEEL (p. 32–37)

Sujita Darmo

University of Mataram, Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4516-3554>

Sinarep Sinarep

University of Mataram, Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1515-9279>

Rudy Soenoko

Brawijaya University Malang, Malang, Indonesia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0537-4189>

In the present study, various quenching media were added as cooling media for the quenching after pack carburizing treatment. The aim of this research is to get a suitable cooling medium for pack carburizing quenching treatment to increase the wear resistance of low carbon steel. Many cylindrical specimens for

the adhesion wear tests were prepared from the used SS400 steel according to ASTM G99-04 specifications. Two heat treatment processes, namely pack carburizing and quenching were done. Firstly, the specimens are pack-carburized at a temperature of 875 °C, soaking time of 2 hours and quenched. The carburizing agent consists of Pinctada maxima shell powder (PMSP) and corn cob charcoal with a weight ratio of 30:70 %. Different cooling media (water, 10 % NaCl solution, 10 % cane molasses) in the pack carburizing quenching treatment are subjected to different kinds of tests. The hardness test was performed using Vickers micro hardness tester, the wear resistance was used in adhesive wear test, the carbon content was determined and microstructure examination was made using a scanning electron microscope (SEM-EDX). The result showed that all cooling media contributed to an increase in mechanical properties (surface hardness number, wear resistance), carbon content and microstructure change. The use of cooling media in the pack carburizing quenching process generally increases the surface hardness number of the specimen. The highest surface hardness number was 595 kg/mm², respectively using 10 % cane molasses. The work shows that cane molasses can be used as a cooling medium for pack carburizing quenching of SS400 steel and contributed to the improvement of wear resistance.

Keywords: low carbon steel, SS400 steel, hardness test, wear test, SEM-EDX, cooling medium, pack carburizing, quenching, surface hardness number, wear resistance.

References

1. Hassan, K. S. (2015). Comparative of wear resistance of low carbon steel pack carburizing using different media. *International Journal of Engineering & Technology*, 4 (1), 71. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v4i1.3866>
2. Hawas, M. N. (2013). Effect of Ageing Time on Adhesive Wear of AL Alloy AA6061-T6. *Journal of Kerbala University*, 9 (2), 145–152.
3. Stainless Steel: Tables of Technical Properties. Available at: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf
4. Singh, S. (2013). Effect of Soaking Time And Applied Load On Wear Behavior of Carburized Mild Steel. *IOSR Journal of Engineering*, 03 (02), 10–19. doi: <https://doi.org/10.9790/3021-03211019>
5. García Molleja, J., Milanese, M., Piccoli, M., Moroso, R., Niedbalski, J., Nosei, L. et. al. (2013). Stability of expanded austenite, generated by ion carburizing and ion nitriding of AISI 316L SS, under high temperature and high energy pulsed ion beam irradiation. *Surface and Coatings Technology*, 218, 142–151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.043>
6. Wei, Y., Zurecki, Z., Sisson, R. D. (2015). Optimization of processing conditions in plasma activated nitrogen–hydrocarbon carburizing. *Surface and Coatings Technology*, 272, 190–197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.006>
7. Morita, T., Hirano, Y., Asakura, K., Kumakiri, T., Ikenaga, M., Kagaya, C. (2012). Effects of plasma carburizing and DLC coating on friction-wear characteristics, mechanical properties and fatigue strength of stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 558, 349–355. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.011>
8. Raza, M. A., Asgar, H., Abdullah, A., Ahmad, R., Inam, A., Ghauri, F. A. (2016). Carburising of Low-Carbon Steel Using Carbon Black Nanoparticles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (11), 4661–4667. doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2229-9>
9. Chen, Z., Zhou, T., Zhao, R., Zhang, H., Lu, S., Yang, W., Zhou, H. (2015). Improved fatigue wear resistance of gray cast iron by lo-

calized laser carburizing. *Materials Science and Engineering: A*, 644, 1–9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.046>

10. Nwoke, V. U., Nnuka, E. E., Odo, J. U., Obiorah, S. M. O. (2014). Effect of Process Variables On The Mechanical Properties Of Surface Hardened Mild Steel Quenched In Different Media. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 3 (4), 388–398.
11. Darmo, S., Soenoko, R., Siswanto, E., Widodo, T. D. (2018). Study Pack Carburizing for Subsoil Plow Chisel with Alternative Carburizer Media Corn Cob Charcoal–Pictada Maxima Shell Powder. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9, 443–449.
12. Dodo, M. R., Dauda, E. T., Adamu, M. A. (2016). Investigating the cooling rate of cane molasses as quenching medium for 0.61% C high carbon steels. *Metallurgical and Materials Engineering*, 22 (1), 39–50. doi: <https://doi.org/10.30544/139>
13. Farre, B., Brunelle, A., Lapr evote, O., Cuif, J.-P., Williams, C. T., Dauphin, Y. (2011). Shell layers of the black-lip pearl oyster *Pinctada margaritifera*: Matching microstructure and composition. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 159 (3), 131–139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2011.03.001>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.230078
IDENTIFICATION OF PATTERNS IN THE
STRUCTURAL AND PHASE COMPOSITION OF THE
DOPING ALLOY DERIVED FROM METALLURGICAL
WASTE PROCESSING (p. 38–43)

Anatolii Poliakov

Luhansk National Agrarian University,
 Starobilsk, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5332-3696>

Anatolii Dzyuba

Luhansk National Agrarian University, Starobilsk, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4100-3094>

Vadym Volokh

Luhansk National Agrarian University, Starobilsk, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7975-6377>

Artem Petryshchev

Zaporizhzhia Polytechnic National University,
 Zaporizhzhya, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2631-1723>

Bohdan Tsymbal

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2317-3428>

Mykhail Yamshinskij

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv
 Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

Ivan Lukianenko

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv
 Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

Andrey Andreev

Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5390-6813>

Tamara Bilko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
 Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3164-3298>

Victor Rebenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
 Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3370-3760>

This paper reports a study into the structural-phase composition of the doping alloy made by processing metallurgical anthropogenic waste involving reduction smelting. This is required for determining the technological parameters that ensure an increase in the level of extraction of target elements during the processing of anthropogenic waste and for the further use of the doping alloy. It was revealed that the phase composition of the doping alloy manifested a solid solution of the doping elements and carbon in α -Fe. Cementite Fe_3C and silicides Fe_3Si_3 , FeSi , and FeSi_2 were also identified. In this case, the doping elements were more likely to act as substitution atoms. It has been determined that the microstructure of the alloy consisted of several phases of different shapes and contents of the basic doping elements. Sites with an elevated iron level of up to 95.87 % by weight in the composition could be represented by the solid solution phase of the doping elements and carbon in α -Fe. The sites with a relatively high (% by weight) content of carbon (0.83–2.17) and doping elements – W, up to 39.41; Mo, up to 26.17; V, to 31.42; Cr, to 9.15 – were apparently of a carbide nature. The sites with a silicon content of 0.43–0.76 % by weight likely included silicide compounds. The alloy’s characteristics make it possible to smelt steel grades without strict carbon restrictions, replacing some of the standard ferroalloys. Neither phases nor compounds with a relatively high propensity for sublimation were identified in the material produced. Therefore, there is no need to provide conditions to prevent evaporation and loss in the gas phase of the doping elements. That could increase the degree of extraction of the doping elements.

Keywords: oxide anthropogenic waste, doped steel scale, reduction smelting, X-ray phase examination.

References

1. Henckens, M. L. C. M., van Ierland, E. C., Driessen, P. P. J., Worrell, E. (2016). Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy*, 49, 102–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.012>
2. Sekiguchi, N. (2017). Trade specialisation patterns in major steel-making economies: the role of advanced economies and the implications for rapid growth in emerging market and developing economies in the global steel market. *Mineral Economics*, 30 (3), 207–227. doi: <https://doi.org/10.1007/s13563-017-0110-2>
3. Mechachti, S., Benchiheb, O., Serrai, S., Shalabi, M. (2013). Preparation of iron Powders by Reduction of Rolling Mill Scale. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4 (5), 1467–1472.
4. Petryshchev, A., Milko, D., Borysov, V., Tsymbal, B., Hevko, I., Borysova, S., Semenchuk, A. (2019). Studying the physicalchemical transformations at resourcesaving reduction melting of chrome–nickelcontaining metallurgical waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (12 (98)), 59–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160755>
5. Petryshchev, A., Braginec, N., Borysov, V., Bratishko, V., Torubara, O., Tsymbal, B. et. al. (2019). Study into the structuralphase transformations accompanying the resourcesaving technology of metallurgical waste processing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (100)), 37–42. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175914>

6. Azimi, G., Shamanian, M. (2010). Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 505 (2), 598–603. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.084>
7. Baghdasaryan, A. M., Niazyan, O. M., Khachatryan, H. L., Kharatyan, S. L. (2014). DTA/TG study of tungsten oxide and ammonium tungstate reduction by (Mg+C) combined reducers at non-isothermal conditions. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 43, 216–221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.12.003>
8. Islam, M., Martinez-Duarte, R. (2017). A sustainable approach for tungsten carbide synthesis using renewable biopolymers. *Ceramics International*, 43 (13), 10546–10553. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.118>
9. Torabi, O., Golabgir, M. H., Tajizadegan, H., Torabi, H. (2014). A study on mechanochemical behavior of MoO₃–Mg–C to synthesize molybdenum carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 47, 18–24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.06.001>
10. Zhu, H., Li, Z., Yang, H., Luo, L. (2013). Carbothermic Reduction of MoO₃ for Direct Alloying Process. *Journal of Iron and Steel Research International*, 20 (10), 51–56. doi: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(13\)60176-4](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(13)60176-4)
11. Simonov, V. K., Grishin, A. M. (2013). Thermodynamic analysis and the mechanism of the solid-phase reduction of Cr₂O₃ with carbon: Part 1. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2013 (6), 425–429. doi: <https://doi.org/10.1134/s0036029513060153>
12. Zhao, L., Wang, L., Chen, D., Zhao, H., Liu, Y., Qi, T. (2015). Behaviors of vanadium and chromium in coal-based direct reduction of high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates followed by magnetic separation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25 (4), 1325–1333. doi: [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(15\)63731-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(15)63731-1)

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.217579
DECOMPOSITION OF FERRONICKEL SLAG
THROUGH ALKALI FUSION IN THE ROASTING
PROCESS (p. 44–51)

Wahyu Mayangsari

Universitas Indonesia, Jawa Barat, Indonesia
 Indonesia Institute of Sciences, Kawasan Puspiptek Serpong,
 Tangerang Selatan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7941-5510>

Isma Nur Avifah

Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

Agus Budi Prasetyo

Indonesia Institute of Sciences, Kawasan Puspiptek Serpong,
 Tangerang Selatan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7514-4648>

Eni Febriana

Indonesia Institute of Sciences, Kawasan Puspiptek Serpong,
 Tangerang Selatan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1816-9598>

Ahmad Maksum

Politeknik Negeri Jakarta, Kukusan, Kecamatan Beji, Kota Depok,
 Jawa Barat, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1800-9137>

Reza Miftahul Ulum

Universitas Indonesia, Jawa Barat, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7047-8988>

Florentinus Firdiyono

Indonesia Institute of Sciences, Kawasan Puspiptek Serpong,
 Tangerang Selatan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4686-1626>

Rudi Subagja

Indonesia Institute of Sciences, Kawasan Puspiptek Serpong,
 Tangerang Selatan, Indonesia

Johny Wahyuadi Soedarsono

Universitas Indonesia, Jawa Barat, Indonesia, 16424
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6051-2866>

Ferronickel slag is a by-product of the nickel smelting process. Recycling of ferronickel slag is required since it contains valuable elements besides its potency to pollute the environment. In order to take advantage of the valuable materials and reducing the potential hazard, beneficiation of ferronickel slag is essential. Alkali fusion of ferronickel slag using Na₂CO₃ in the roasting process was carried out. This study aims to determine the decomposition of the mixture of ferronickel slag–Na₂CO₃ in the roasting process. Roasting temperature and time were 800–1,000 °C and 60–240 minutes, respectively. Characterizations of the ferronickel slag were conducted by XRF, ICP-OES, XRD and SEM-EDS. Meanwhile, roasted products were characterized using ICP-OES, XRD and SEM-EDS. Characterization of the ferronickel slag indicates that Mg and Si are the main elements followed by Fe, Al and Cr. Moreover, olivine is detected as the main phase. The roasting process caused percent weight loss of the roasted products, which indicates decomposition occurred and affected the elements content, phases and morphology. The roasting process at about 900 °C for 60 minutes is a preferable decomposition base on the process conditions applied and the change of elements content. Aluminum (Al) and chromium (Cr) content in the roasted products upgraded significantly compared to iron (Fe) and magnesium (Mg) content. Olivine phase transforms to some phases, which were bounded with the sodium compound such as Na₂MgSiO₄, Na₄SiO₄ and Na₂CrO₄. The rough layer is observed on the surface of the roasted product as a result of the decomposition process. It indicates that liquid-solid mass transfer is initiated from the surface.

Keywords: ferronickel, slag, alkali fusion, roasting, thermal, decomposition, Na₂CO₃, olivine, aluminum, chromium, iron, magnesium.

References

1. Sagadin, C., Luidold, S., Wagner, C., Wenzl, C. (2016). Melting Behaviour of Ferronickel Slags. *JOM*, 68 (12), 3022–3028. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2140-6>
2. Fernández-Jiménez, A., Arbi, K., Palomo, A. (2014). Alkali-activated slag cements: Blast furnace versus ferronickel slag. 34th Cement and Concrete Science Conference, 203–206.
3. Maragkos, I., Giannopoulou, I. P., Panias, D. (2009). Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers. *Minerals Engineering*, 22 (2), 196–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.07.003>
4. Gu, F., Zhang, Y., Peng, Z., Su, Z., Tang, H., Tian, W. et. al. (2019). Selective recovery of chromium from ferronickel slag via alkaline roasting followed by water leaching. *Journal of Hazardous Materials*, 374, 83–91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.002>
5. Prasetyo, A. B., Maksum, A., Soedarsono, J. W., Firdiyono, F. (2019). Thermal characteristics of ferronickel slag on roasting process with addition of sodium carbonate (Na₂CO₃). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 541, 012037. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/541/1/012037>

6. Huang, Y., Wang, Q., Shi, M. (2017). Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder. *Construction and Building Materials*, 156, 773–789. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.038>
7. Fang, D., Xue, J., Xuan, L. (2018). Recycling SiO₂ and Al₂O₃ from the Laterite Nickel Slag in Molten Sodium Hydroxides. 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, 245–257. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72138-5_25
8. Guo, Z., Zhu, D., Pan, J., Zhang, F. (2017). Mineralogical Characteristics and Preliminary Beneficiation of Nickel Slag from Reduction Roasting-Ammonia Leaching. *Minerals*, 7 (6), 98. doi: <https://doi.org/10.3390/min7060098>
9. Tangahu, B. V., Warmadewanthi, I., Saptarini, D., Pudjiastuti, L., Tardan, M. A. M., Luqman, A. (2015). Ferronickel Slag Performance from Reclamation Area in Pomalaa, Southeast Sulawesi, Indonesia. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 05 (03), 408–412. doi: <https://doi.org/10.4236/aces.2015.53041>
10. Demotica, J. S., Jr., R. F. A., Malaluan, R. M., Demayo, C. G. (2012). Characterization and Leaching Assessment of Ferronickel Slag from a Smelting Plant in Iligan City, Philippines. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3 (5), 470–474. doi: <https://doi.org/10.7763/ijesd.2012.v3.269>
11. Kang, S., Park, K., Kim, D. (2014). Potential Soil Contamination in Areas Where Ferronickel Slag Is Used for Reclamation Work. *Materials*, 7 (10), 7157–7172. doi: <https://doi.org/10.3390/ma7107157>
12. Xi, B., Li, R., Zhao, X., Dang, Q., Zhang, D., Tan, W. (2018). Constraints and opportunities for the recycling of growing ferronickel slag in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 15–16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.002>
13. Kuck, P. H. (2015). Nickel. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 108–109. Available at: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/nickel/mcs-2015-nicke.pdf>
14. Kuck, P. H. (2016). Nickel. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 114–115. Available at: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/nickel/mcs-2016-nicke.pdf>
15. Schnebele, E. K. (2017). Nickel. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 114–115. Available at: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/nickel/mcs-2017-nicke.pdf>
16. McRae, M. E. (2018). Nickel. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 112–113. Available at: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/nickel/mcs-2018-nicke.pdf>
17. Mufakhir, F. R., Mubarak, M. Z., Ichlas, Z. T. (2018). Leaching of silicon from ferronickel (FeNi) smelting slag with sodium hydroxide solution at atmospheric pressure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 285, 012003. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/285/1/012003>
18. Patrick, J., Prasetyo, A. B., Munir, B., Maksum, A., Soedarsono, J. W. (2018). The effect of addition of sodium sulphate (Na₂SO₄) to nickel slag pyrometallurgical process with temperature and additives ratio as variables. *E3S Web of Conferences*, 67, 03053. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186703053>
19. Pangaribuan, R. H., Patrick, J., Prasetyo, A. B., Maksum, A., Munir, B., Soedarsono, J. W. (2018). The effect of NaOH (natrium hydroxide) to slag nickel pyrometallurgy in different temperature and additive ratio. *E3S Web of Conferences*, 67, 03052. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186703052>
20. Gu, F., Peng, Z., Zhang, Y., Tang, H., Ye, L., Tian, W. et. al. (2019). Thermodynamic Characteristics of Ferronickel Slag Sintered in the Presence of Magnesia. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials* 2019, 379–388. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_38
21. Zhang, X., Gu, F., Peng, Z., Wang, L., Tang, H., Rao, M. et. al. (2019). Recovering Magnesium from Ferronickel Slag by Vacuum Reduction: Thermodynamic Analysis and Experimental Verification. *ACS Omega*, 4 (14), 16062–16067. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02262>
22. Peng, Z., Wang, L., Gu, F., Tang, H., Rao, M., Zhang, Y. et. al. (2020). Recovery of chromium from ferronickel slag: A comparison of microwave roasting and conventional roasting strategies. *Powder Technology*, 372, 578–584. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.103>
23. Prasetyo, A. B., Darmawansyah, R., Mayangsari, W., Febriana, E., Permana, S., Maksum, A. et. al. (2020). Reverse leaching of magnesium from ferronickel slag using alkali solvent NaOH. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (103)), 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193885>
24. Alfari, M. D., Mayangsari, W., Prasetyo, A. B., Maksum, A., Prasetyo, T., Ulum, R. M., Soedarsono, J. W. (2020). Effect of sodium carbonate (Na₂CO₃) additives and palm kernel shell charcoal to increase nickel and iron content from ferronickel slag using the pyrometallurgical method. *AIP Conference Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0014052>
25. Liu, R., Zhai, Q., Wang, C., Li, X., Sun, W. (2020). Optimizing the Crystalline State of Cu Slag by Na₂CO₃ to Improve Cu Recovery by Flotation. *Minerals*, 10 (9), 820. doi: <https://doi.org/10.3390/min10090820>
26. Zhu, Z., You, J., Zhang, X., Wang, J., Duan, J., Zhang, T. et. al. (2020). Estimation of Thermodynamic Properties of Sodium Magnesium Silicates by the Polyhedron Method. *The Minerals, Metals & Materials Series*, 215–226. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-36540-0_20
27. Mubarak, M. Z., Yudiarto, A. (2017). Synthesis of Magnesium Oxide from Ferronickel Smelting Slag Through Hydrochloric Acid Leaching-Precipitation and Calcination. *Energy Technology* 2017, 247–258. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-52192-3_24

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229642

INFLUENCE OF MELT TREATMENT PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF MODIFIED CAST IRON IN THE METALLURGICAL INDUSTRY USING INTELLECTUAL ANALYSIS METHODS (p. 52–58)

Boldyrev Denis

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6951-5825>

Dema Roman

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9398-4165>

Latypov Oleg

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6531-1358>

Anton Zhilenkov

Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-1318>

Vitalii Emelianov

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9087-2504>

Alexey Nedelkin

Plekhanov Russian University of Economics,

Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1693-1646>

A study of the effect of holding the cast iron melt at temperatures of 1,300, 1,450 and 1,600 °C for 20, 55 and 90 minutes on the structure and properties of cast iron in a liquid state and after crystallization was carried out. The studies were carried out on samples with a diameter of 30 mm; cast iron containing 3.61–3.75 % carbon, 1.9–2.4 % silicon, 0.03 % manganese, 0.081–0.084 % phosphorus, 0.031–0.039 % sulfur was poured into green-sand molds. The samples were cast from the original cast iron (unmodified), modified with ferrosilicon 75 GOST 1415-93 (FS75), rare-earth metals (REM) and together with the REM+FS75 complex. The structure of cast iron was investigated by optical metallography, electron microscopy and X-ray structural analysis. An increase in the holding temperature and time of the cast iron melt leads to an increase in its hardness. An increase in temperature at a short holding time leads to an increase in strength in the entire investigated temperature range (1,300–1,600 °C). Holding for 90 minutes at a temperature of 1,450 °C corresponds to an extremum, after which, with a further increase in temperature, a sharp drop in strength is observed. The change in the toughness of cast iron is characterized in a similar way.

Keywords: data mining, heat-time treatment, chemical parameter, ferrosilicon, rare-earth metals, engineering, pyroelectric, transformation, optimization, structure.

References

- Berns, H., Theisen, W. (2008). *Ferrous Materials. Steel and Cast Iron*. Springer, 418. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71848-2>
- Tsepelev, V. S., Selyanin, I. F., Lubyanyoy, D. A., Baum, B. A. et al. (1995). Termovremennaya obrabotka rasplava chuguna. *Stal'*, 5, 42–45.
- Kolokol'tsev, V. M., Shevchenko, A. V. (2011). Povyshenie svoystv otlivok iz chugunov spetsial'nogo naznacheniya putem rafinirovaniya i modifitsirovaniya ih rasplavov. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G. I. Nosova*, 1, 23–29.
- Boldyrev, D. A., Shapovalov, A. N., Nefedyef, S. P., Dema, R. R., Kononov, V. N., Kharchenko, M. V. et al. (2019). The electron-microscopic and x-ray spectral analysis of phase composition of CGI inoculant structure. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 54 (2), 348–361.
- Baum, B. A., Hasin, G. A., Tyagunov, G. V. et al. (1984). *Zhidkaya stal'*. Moscow: Metallurgiya, 208.
- Lubyanyoy, D. A. (2004). Rezul'taty vnedreniya termovremennoy obrabotki na predpriyatiyah Kuzbassa. *Liteyschik Rossii*, 7, 22–23.
- Lubyanyoy, D. A. (2004). Primenenie rezonansno-pul'siruyushchego rafinirovaniya dlya povysheniya kachestva izdeliy iz chuguna. *Liteyschik Rossii*, 7, 30–32.
- Petrus, Ł., Bulanowski, A., Kołakowski, J., Brzeżański, M., Urbanowicz, M., Sobieraj, J. et al. (2020). The Influence of Selected Melting Parameters on the Physical and Chemical Properties of Cast Iron. *Archives of Foundry Engineering*, 20, 105–110. doi: <http://doi.org/10.24425/afe.2020.131290>
- Edalati, K., Akhlaghi, F., Nili-Ahmadabadi, M. (2005). Influence of SiC and FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*, 160 (2), 183–187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.06.007>
- Ren, F., Li, F., Liu, W., Ma, Z., Tian, B. (2009). Effect of inoculating addition on machinability of gray cast iron. *Journal of Rare Earths*, 27 (2), 294–299. doi: [https://doi.org/10.1016/s1002-0721\(08\)60236-7](https://doi.org/10.1016/s1002-0721(08)60236-7)
- Novik, F. S., Arsov, Ya. B. (1980). *Optimizatsiya protsessov tehnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov*. Moscow: Mashinostroeniye; Sofiya: Tehnika, 304.
- Zhukov, V. A., Masyutkin, E. P., Avdeyev, B. A. (2017). The application of mathematical modeling for the development of devices as an example of viscous fluid purification from magnetic impurity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 177, 012015. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/177/1/012015>
- Avdeev, B., Vyngra, A., Chernyi, S. (2020). Improving the Electricity Quality by Means of a Single-Phase Solid-State Transformer. *Designs*, 4 (3), 35. doi: <https://doi.org/10.3390/designs4030035>
- Emelianov, V., Emelianova, N., Zhilenkov, A., Chernyi, S. (2021). Application of Information Technologies and Programming Methods of Embedded Systems for Complex Intellectual Analysis. *Entropy*, 23 (1), 94. doi: <https://doi.org/10.3390/e23010094>
- Chernyi, S. G., Erofeev, P., Novak, B., Emelianov, V. (2021). Investigation of the Mechanical and Electromechanical Starting Characteristics of an Asynchronous Electric Drive of a Two-Piston Marine Compressor. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (2), 207. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse9020207>
- Smetiukh, N., Shnurenko, A., Golikov, S., Zhukov, V., Chernyi, S. (2016). Development of component of intelligent combined model of simulator for training skippers in trawl and purse seine fishing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (79)), 38–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.61152>
- Sakharov, V., Chernyi, S., Saburov, S., Chertkov, A. (2020). Wavelet Transforms of Diagnosable Signals from Ship Power Complexes in a MATLAB Environment. *Designs*, 4 (4), 52. doi: <https://doi.org/10.3390/designs4040052>
- Tsvelen'ev, B. V., Peregudov, L. V., Evdokimov, E. G. (1983). Vliyanie termovremennoy obrabotki rasplava na strukturu modifitsirovannogo chuguna. *Vysokopevne Materialy – Nekonvencne Metalurgie*. CSVTS: Bratislava, 163–166.
- Peregudov, L. V., Evdokimov, E. G., Malashin, M. M. (1983). Vliyanie termovremennoy obrabotki rasplava na strukturu i svoystva vysokoprochnogo chuguna. *Liteynoe proizvodstvo*, 12, 10–11.
- Boldyrev, D. A., Popova, L. I. (2018). The Structures and Properties of the Inoculated Cast Irons after the Temperature – Time Processing. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 1 (1), 93–96. Available at: <https://chermetinfo.elpub.ru/jour/article/view/839>
- Evdokimov, E. G., Hohlov, S. V., Tsvelen'ev, B. V. (1999). Issledovanie parametrov plavki i modifitsirovaniya chuguna. *Liteynoe proizvodstvo*, 4, 14–16.
- Zenkin, R. N. (2013). Mehanizm kristallizatsii vysokoprochnogo chuguna. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 6, 192–200.
- Evdokimov, E. G., Baranov, A. A., Val'ter, A. I. (2004). Genezis elektronnoy konfiguratsii v zhelezouglerodistykh splavah. *Tula: Izd-vo TulGU*, 192.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.226342**АНАЛІЗ ОКСИДУ ПОДВІЙНОГО ПЕРОВСКІТУ $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ ДЛЯ ТВЕРДОКСИДНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В ДІАПАЗОНІ ПРОМІЖНИХ ТЕМПЕРАТУР (с. 6–14)****Adi Subardi, Iwan Susanto, Ratna Kartikasari, Tugino Tugino, Hasta Kuntara, Andy Erwin Wijaya, Muhamad Jalu Purnomo, Ade Indra, Hendriwan Fahmi, Yen-Pei Fu**

Основною перешкодою для впровадження твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ) є висока робоча температура в діапазоні 800–1000 °С, що позначається на високих витратах. ТОПЕ працюють при високих температурах, що викликає швидкий розрив між шарами (анод, електроліт і катод), оскільки вони мають різне теплове розширення. Дослідження присвячено зниженню робочої температури в середньому температурному діапазоні. В якості катодного матеріалу для ПТ-ТОПЕ на основі електроліту $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.9}$ (SDC) був досліджений оксид $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ (SBSC). Порошок SBSC отримували методом твердофазної реакції з повторним подрібненням в кульовому млині і прожарюванням. Використовувалися мелючі кулі з оксиду алюмінію, оскільки вони мають високу твердість для подрібнення і згладжування порошку матеріалу ТОПЕ. Потім було проведено випробування зразків в якості катодного матеріалу для ТОПЕ при проміжній температурі (600–800 °С) з використанням порошкової рентгенівської дифракції (ПРД), термогравіметричного аналізу (ТГА), електрохімічних випробувань і скануючої електронної мікроскопії (СЕМ). Дифрактограму порошку SBSC можна індексувати за тетрагональною кристалографічною групою (P4/mmm). Загальна зміна маси порошку SBSC становить 8 % в діапазоні температур 125–800 °С. Зразок порошку SBSC показав високий вміст кисню ($5+\delta$), що досягав 5,92 і 5,41 при температурах 200 °С і 800 °С відповідно. Високий вміст кисню ($5+\delta$) може впливати на високі рівні дифузії і підвищену поверхневу активність реакцій відновлення кисню (РВК). Поляризаційний опір (R_p) зразків, спечених при 1000 °С, становить 4,02 Омсм² при 600 °С, 1,04 Омсм² при 700 °С і 0,42 Омсм² при 800 °С. Питома потужність катода SBSC становить 336,1, 387,3 і 357,4 МВт/см² при температурі 625 °С, 650 °С і 675 °С відповідно. SBSC демонструє перспективність в якості катодного матеріалу для ПТ-ТОПЕ.

Ключові слова: твердооксидний паливний елемент, теплові властивості, вміст кисню, електрохімічні властивості, продуктивність елемента.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.227224**АНАЛІЗ МІЦНОСТІ НА РОЗРИВ І ТЕПЛОВОГО ЦИКЛУ ФРИКЦІЙНИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З АА6061 З РІЗНИМ ДІАМЕТРОМ І ЧАСОМ ТЕРТЯ (с. 15–21)****Yudy Surya Irawan, Moch Agus Choiron, Wahyono Suprpto**

У статті представлено вимірювання міцності на розрив і теплового циклу фрикційного шва круглого стрижня з алюмінієвого сплаву АА6061 з різним діаметром і часом тертя. Для зварювання круглого стрижня з АА6061 з різним діаметром 30 мм для обертової частини і 15 мм для нерухомої частини було проведено зварювання тертям з безперервним приводом (ЗТБП) АА6061. Процес ЗТБП здійснювався зі швидкістю обертання 2300 об/хв, початковим зусиллям стиснення 2,8 кН з різним часом тертя 10, 12 і 14 секунд і зусиллям осадки 28 кН протягом 60 секунд. Температуру ґрата вимірювали за допомогою цифрового інфрачервоного термометра. Комп'ютерне моделювання з використанням методу скінчених елементів також проводилося шляхом об'єднання перехідних теплових і статичних структурних методів. На основі вимірювань цифрового інфрачервоного термометра і аналізу методом скінчених елементів, температура ґрата підвищується зі збільшенням часу тертя. Результати випробувань міцності на розрив показують, що зразок з часом тертя 12 секунд має найбільшу міцність на розрив. На підставі результатів випробувань на твердість встановлено, що зразок з часом тертя 10 секунд має більш високу твердість, але неповний ґрат, таким чином міцність на розрив нижче, ніж у зразка з часом тертя 12 секунд. Крім того, твердість зразка з часом тертя 12 секунд вище, ніж у зразка з часом тертя 14 секунд. На підставі спостереження макроструктури на поздовжньому перерізі зразка ЗТБП, розмір ґрата збільшується зі збільшенням часу тертя. Вимірювання температури і аналіз методом скінчених елементів підтверджують, що зразок з часом тертя 12 секунд має теплову потужність для формування з'єднання ЗТБП, що має максимальну міцність на розрив в рамках даного дослідження.

Ключові слова: алюміній, зварювання тертям, міцність на розрив, аналіз методом скінчених елементів, тепловий цикл.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228161**ВПЛИВ ПОСЛІДОВНОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ТА ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ НА ДЕФОРМАЦІЮ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА МЕТАЛУРГІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРБІТАЛЬНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ З НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ 316L (с. 22–31)****Agus Widianto, Ario Sunar Baskoro, Gandjar Kiswanto, Muhamad Fathin Ginanjar Ganeswara**

Орбітальне зварювання труб часто використовувалося для виготовлення трубопровідних систем. При орбітальному зварюванні труб основною проблемою є положення зварювального пальника в процесі зварювання, тому для вирішення цих проблем необхідні додаткові методи. У даній роботі розглядається вплив послідовності зварювання і зварювального струму на деформацію, механічні

властивості і металургійні дослідження орбітального зварювання труб з нержавіючої сталі 316L зі стиковим з'єднанням без скосу кромки. Змінними параметрами орбітального зварювання труб є зварювальний струм і послідовність зварювання. Використовуваний зварювальний струм становить 100 А, 110 А і 120 А, послідовність зварювання становить одну послідовність, дві послідовності, три послідовності і чотири послідовності. Результати зварювання аналізуються на основі вимірювання деформації, випробування механічних властивостей і металургійних досліджень. Вимірювання деформації труби проводяться до зварювання і після зварювання. Випробування механічних властивостей включають випробування на розтягування і мікротвердість, металургійні дослідження включають дослідження макроструктури і мікроструктури. Результати показують, що максимальна осьова деформація, поперечна деформація, овальність і конусність спостерігалися при зварювальному струмі 120 А з чотирма послідовностями 445 мкм, 300 мкм, 195 мкм і 275 мкм відповідно. Зниження межі міцності на розтяг становить 51 % в порівнянні з межею міцності на розтяг основного металу. Випробування на горизонтальну і вертикальну мікротвердість показують, що зварювання з однією послідовністю дає найбільше значення мікротвердості, в той час як при зварюванні з двома-чотирма послідовностями відбувається зниження значення мікротвердості. При орбітальному зварюванні труб глибина проплавлення в кожному положенні труби різнилась. Найбільша і найменша глибина проплавлення складала 4,11 мм і 1,60 мм відповідно.

Ключові слова: послідовність зварювання, орбітальне зварювання труб, газове вольфрамове дугове зварювання, деформація, нержавіюча сталь 316L.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228627

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТВЕРДОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ З ГАРТУВАННЯМ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРОСТИННОЇ ПАТОКИ В ЯКОСТІ ХОЛОДОАГЕНТУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ (с. 32–37)

Sujita Darmo, Sinarep Sinarep, Rudy Soenoko

У даному дослідженні в якості холодоагентів для гартування після твердої цементациї додавали різні гартувальні середовища. Метою даного дослідження є отримання відповідного холодоагенту для твердої цементациї з гартуванням для підвищення зносостійкості низьковуглецевої сталі. Для випробувань на адгезійний знос було виготовлено багато циліндричних зразків з використаної сталі SS400 відповідно до стандартів ASTM G99-04. Були проведені два процеси термічної обробки, а саме тверда цементациї і гартування. Спочатку зразки піддають твердій цементациї при температурі 875 °С, часі витримки 2 години і гартуванню. Карбюризатор складається з порошку шкаралупи молюска *Pinctada maxima* і вугілля з кукурудзяних стрижнів з масовим співвідношенням 30:70 %. У процесі твердої цементациї з гартуванням різні холодоагенти (вода, 10 % розчин NaCl, 10 % тростинна патока) піддають різним видам випробувань. Випробування на твердість проводили за допомогою мікротвердомера по Віккерсу, зносостійкість використовували при випробуванні на адгезійний знос, визначали вміст вуглецю і проводили дослідження мікроструктури за допомогою скануючого електронного мікроскопа (СЕМ-ЕРС). Результат показав, що всі холодоагенти сприяли підвищенню механічних властивостей (поверхнева твердість, зносостійкість), зміні вмісту вуглецю і мікроструктури. Використання холодоагентів в процесі твердої цементациї з гартуванням, як правило, збільшує поверхневу твердість зразка. Найбільше значення поверхневої твердості складало 595 кг/мм², відповідно, при використанні 10 % тростинної патоки. У роботі показано, що тростинна патока може використовуватися в якості холодоагенту для твердої цементациї з гартуванням сталі SS400 і сприяла підвищенню зносостійкості.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, сталь SS400, випробування на твердість, випробування на знос, СЕМ-ЕРС, холодоагент, тверда цементациї, гартування, поверхнева твердість, зносостійкість.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.230078

ВИЯВЛЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СКЛАДУ ЛЕГУЮЧОГО СПЛАВУ, ОТРИМАНОГО ПЕРЕРОБКОЮ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ (с. 38–44)

А. М. Поляков, А. І. Дзюба, В. О. Волох, А. С. Петрищев, Б. М. Цимбал, М. М. Ямшинський, І. В. Лук'яненко, А. М. Андрєєв, Т. О. Білько, В. І. Ребенко

Досліджено структурно-фазовий склад легуючого сплаву, отриманого переробкою металургійних техногенних відходів з використанням відновної плавки. Це необхідно для визначення технологічних параметрів, що забезпечують підвищення рівня вилучення цільових елементів при переробці техногенних відходів і при подальшому використанні легуючого сплаву. Виявлено, що у фазовому складі легуючого сплаву мав прояв твердий розчин легуючих елементів та вуглецю в α -Fe. Також були виявлені цементит Fe₃C і силіциди заліза Fe₅Si₃, FeSi і FeSi₂. При цьому легуючі елементи, напевне, більшою мірою перебували в якості атомів заміщення. Визначено, що мікроструктура сплаву складалася з декількох фаз різної форми і вмісту основних легуючих елементів. Области з підвищеним рівнем заліза до 95,87 % мас. у складі могли бути представлені фазою твердого розчину легуючих елементів та вуглецю в α -Fe. Ділянки з відносно високим вмістом (% мас.) вуглецю 0,83–2,17 і легуючих елементів: W – до 39,41; Mo – до 26,17; V – до 31,42, Cr – до 9,15, напевне, мали карбідну природу. Ділянки з вмістом кремнію 0,43–0,76 % мас. могли включати в собі силіцидні сполуки. Характеристики сплаву забезпечують можливість виплавки марок сталей без жорстких обмежень за вуглецем із заміною частини стандартних феросплавів. Фази і сполуки, що мають відносно високу схильність до сублімації, не були виявлені в отриманому матеріалі. Отже, немає необхідності в забезпеченні умов для запобігання випаровування і втрат в газову фазу легуючих елементів. Ця обставина обумовлює збільшення ступеня вилучення легуючих елементів. Залишковий вуглець і кремній проявлялися у вигляді карбідних і силіцидних фаз, забезпечуючи необхідну відновну і розкиснювальну здатність при використанні сплаву.

Ключові слова: оксидні техногенні відходи, окалина легованих сталей, відновна плавка, рентенофазові дослідження.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.217579**РОЗКЛАДАННЯ ФЕРОНІКЕЛЕВОГО ШЛАКУ МЕТОДОМ ЛУЖНОГО ПЛАВЛЕННЯ В ПРОЦЕСІ ВИПАЛУ (с. 44–51)****Wahyu Mayangsari, Isma Nur Avifah, Agus Budi Prasetyo, Eni Febriana, Ahmad Maksun, Reza Miftahul Ulum, Florentinus Firdiyono, Rudi Subagja, Johny Wahyuadi M. Soedarsono**

Феронікелевий шлак є побічним продуктом процесу виплавки нікелю. Переробка феронікелевого шлаку необхідна, оскільки він містить цінні елементи, має властивість забруднювати навколишнє середовище. Для використання цінних матеріалів і зниження потенційної небезпеки, необхідно збагачення феронікелевого шлаку. Проведено лужне плавлення феронікелевого шлаку з використанням Na_2CO_3 в процесі випалу. Метою даного дослідження є визначення ступеня розкладання суміші феронікелевого шлаку- Na_2CO_3 в процесі випалу. Температура і час випалу становили 800–1000 °C і 60–240 хвилин відповідно. Визначення характеристик феронікелевого шлаку було проведено методами РФА, ІЗП-МС, РДА і РЕМ-ЕРС. Тим часом, визначення характеристик продуктів випалу здійснювалося з використанням ІЗП-МС, РДА і РЕМ-ЕРС. Визначення характеристик феронікелевого шлаку показує, що основними елементами є Mg і Si, за якими слідують Fe, Al і Cr. Причому олівін визначається як основна фаза. Процес випалу викликав процентну втрату маси продуктів випалу, що свідчить про розкладання і вплив на зміст елементів, фази і морфологію. Процес випалу при температурі близько 900 °C протягом 60 хвилин є кращою основою розкладання в залежності від умов процесу і зміни змісту елементів. Зміст алюмінію (Al) і хрому (Cr) в продуктах випалу значно зріс в порівнянні з вмістом заліза (Fe) і магнію (Mg). Олівінова фаза переходить в деякі фази, пов'язані з сполукою натрію, такою як $\text{Na}_2\text{MgSiO}_4$, Na_4SiO_4 і Na_2CrO_4 . В результаті процесу розкладання на поверхні продукту випалу спостерігається шорсткий шар. Це вказує на те, що масоперенос рідина-тверда речовина ініціюється з поверхні.

Ключові слова: феронікель, шлак, лужне плавлення, випал, термічний, розкладання, Na_2CO_3 , олівін, алюміній, хром, залізо, магній.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229642**ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФІКОВАНОГО ЧАВУНУ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ (с. 52–58)****Denis Boldyrev, Roman Dema, Oleg Latypov, Anton Zhilenkov, Vitalii Emelianov, Alexey Nedelkin**

Проведено дослідження впливу часу витримки розплаву чавуну при температурах 1300, 1450 і 1600 °C протягом 20, 55 і 90 хвилин на структуру і властивості чавуну в рідкому стані і після кристалізації. Дослідження проводилися на зразках діаметром 30 мм; чавун, що містить 3,61–3,75 % вуглецю, 1,9–2,4 % кремнію, 0,03 % марганцю, 0,081–0,084 % фосфору, 0,031–0,039 % сірки, розливали у форми з сирого піску. Зразки відлиті з вихідного чавуну (немодифікованого), модифікованого феросиліцієм 75 ГОСТ 1415-93 (ФС75), рідкоземельними металами (РЗМ) і спільно з комплексом РЗМ+ФС75. Структура чавуну досліджена методами оптичної металографії, електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу. Збільшення температури і часу витримки розплаву чавуну призводить до збільшення його твердості. Зростання температури при невеликих витримках призводить до зростання міцності у всьому дослідженому інтервалі температур (1300–1600 °C). Витримці 90 хв при температурі 1450 °C відповідає екстремум, після якого при подальшому збільшенні температури спостерігається різке падіння міцності. Аналогічним чином характеризується і зміна ударної в'язкості чавуну.

Ключові слова: інтелектуальний аналіз, термічна обробка, хімічний параметр, феросиліцій, рідкоземельні метали, інженерія, піроелектрик.