

<https://doi.org/10.15407/plit2022.04.034>

УДК: 621.74.046

А. М. Тимошенко, канд. техн. наук, стар. наук. співроб.;

e-mail: Marschal@i.ua, ORCID 0000-0003-4038-1744

В. П. Лихошва, д-р. техн. наук, проф.; e-mail: plazer_v@i.ua,

ORCID 0000-0003-3396-9793

О. В. Шматко, мол. наук. співроб.; e-mail: blacknorfolk@gmail.com,

ORCID 0000-0002-7694-4142

О. А. Пелікан, наук. співроб.; e-mail: otmlp@ptima.kiev.ua,

ORCID 0000-0001-5156-4269

Р. Ф. Ліхацький, асп.; e-mail: richardlihaskyi@gmail.com,

ORCID 0000-0001-8277-5122

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КОМБІНОВАНОГО ЛИВАРНО-ІНДУКЦІЙНОГО МЕТОДУ ОДЕРЖАННЯ ТРИШАРОВИХ ВИЛИВКІВ

Досліджено технологічні особливості розробленого ливарно-індукційного методу одержання тришарових виливків чавун-сталь-чавун. Зазначений метод полягає у використанні індукційного нагріву сталевий заготовки височастотним електромагнітним полем у ливарному процесі одержання тришарових виробів. В роботі представлені результати математичного моделювання розподілу полів температури при дії електромагнітних полів на сталеву заготовку. Встановлено основні закономірності зміни температури сталевий заготовки від сили струму і часу нагріву. В результаті імітаційного моделювання визначено технологічні параметри процесу нагріву та охолодження заготовки, а також заливки розплаву при одержанні тришарових виливків. Встановлені залежності температури розплаву, що заливається від температури заготовки, необхідні для забезпечення якісного зв'язку між заготовкою і робочим шаром. За результатами експериментальної апробації підтверджено адекватність математичного моделювання теплового стану заготовки, а також ефективність використання розробленого комбінованого ливарно-індукційного методу для одержання тришарових виливків.

Ключові слова: ливарно-індукційний метод, індукційний нагрів, імітаційне моделювання, тришарова виливка, електромагнітне поле, розплав.

Введення

На сучасному етапі розвитку науки і техніки виникає необхідність у нових функціональних матеріалах з поліпшеними фізико-хімічними та механічними властивостями. Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми є розробка нових методів виготовлення біметалевих і багатошарових виробів, що мають унікальний комплекс властивостей, диференційованих в об'ємі і по поверхні виробів. Зазначені матеріали можна використовувати для виготовлення молотків, билів, броніфутерування дробарок, зубів ківшів екскаваторів, гальмівних дисків літаків і безлічі інших виробів, які призначені для експлуатації в умовах корозійно-абразивного впливу, високих ударних навантажень і складно-деформованих станів [1]. За техніко-економічними показниками найбільш ефективними методами одержання таких багатошарових і біметалевих виробів традиційно залишаються ливарні технології [2–4] і різні гібридні технології на їх основі [5, 6], в тому числі із застосуванням електромагнітного впливу на метал [7].

Метою даної роботи є застосування комбінованої ливарно-індукційної технології для одержання плоских тришарових виробів з двох або трьох видів матеріалів з товщиною шарів, що варіюється. Висока функціональність таких виробів досягається за допомогою наявності міцної основи у вигляді середнього шару із конструкційної сталі та шарів, що відповідають вимогам експлуатації в агресивних середовищах. Такими матеріалами є: зносостійкі сплави, що не деформуються, – хромисті білі чавуни, кольорові сплави на основі міді.

Одержання такого виробу здійснюється з'єднанням рідкого металу з твердою сталеву підкладку ливарним процесом з додатковим накладенням змінного електромагнітного поля. Застосування інших методів [8–18] (наприклад, ливарно-деформаційних, зварювальних, ударно-вибухових, електрошлакових та інших) для одержання виробів такого виду обмежено або властивостями застосовуваних матеріалів (наявність хоча б одного недеформованого шару), або технологічними можливостями цих методів.

Найважливішою умовою при виготовленні багатошарових виробів, що працюють при високих навантаженнях є забезпечення міцного з'єднання шарів, яке можна отримати дифузійним або металургійним способом. Останнє, однак, передбачає наявність рідкої фази на поверхні твердої заготовки, що створює певні труднощі розробки технології. Найбільш доцільним для даного методу одержання тришарових виробів є забезпечення дифузійного зв'язку при з'єднанні шарів.

Раніше в наших роботах [2, 19] показано, що дифузійне з'єднання рідкого металу з твердою підкладкою з більш тугоплавкого сплаву (сталь) можливе лише за суворого дотримання певного температурного режиму. Температура сталеву підкладки повинна відповідати певним вимогам, а саме бути не нижче температури фазового перетворення ($T_{\gamma-\alpha}$) матеріалу підкладки (конструкційної вуглецевої сталі) і не перевищувати її температуру солідус ($T_{\text{сол}}$). Особливу увагу приділено рівномірному нагріванню плоскої заготовки (сталеву пластини).

Для цього виготовлено джерело живлення потужністю 40 кВт частотою 60 кГц (розробка Інституту електродинаміки НАН України). У джерелі живлення використовуються нові способи керування транзисторними перетворювачами на основі низькочастотної імпульсної модуляції із застосуванням систем автоматичного підстроювання частоти. У джерелі використовуються різні ступені захисту від аварійних режимів, що дозволяє підвищити КПД, надійність та забезпечити роботу при широкому діапазоні зміни параметрів навантаження.

У процесі досліджень розглянуто можливість одержання тришарового виробу на основі сталеву заготовки (SAE 1006) та двох шарів із зносостійкого або антифрикційного чавуну, що використовується для гальмівних колодок або секторів.

Відповідно до вищезазначеного, заливка розплаву повинна здійснюватися на заготовку, нагріту до температури в інтервалі від 800 до 1200 °С. При цьому максимальна температура нагрівання заготовки не повинна перевищувати 1400 °С.

Технологічний процес передбачає транспортування та розміщення нагрітої заготовки у ливарну форму, після чого проводиться одночасне заливання двох шарів розплавом чавуну (рис. 1). Час на транспортування та розміщення нагрітої заготовки становить 8...10 с, у результаті відбувається її охолодження. При цьому заготовка не повинна охолоджуватися

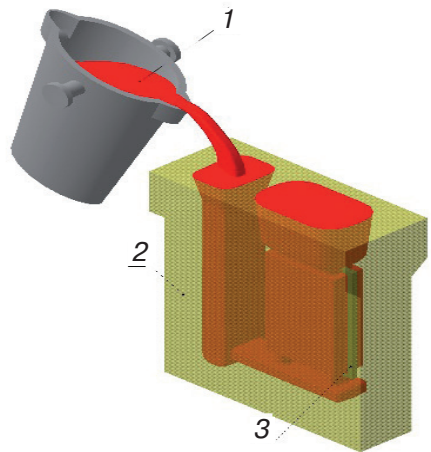


Рис. 1. Технологічна схема одержання тришарового плоского виробу чавун-сталь-чавун

до температури нижче 820 °С (мінімально можливої температури). Отже, для різних типорозмірів та матеріалів виробів виникає необхідність визначення теплового та часового регламенту нагріву заготовки та заливки розплаву, а також створення умов для його реалізації. Найбільш перспективним є спільне використання методів математичного моделювання та натурних експериментів.

У розрахункових дослідженнях здійснення взаємозв'язків електромагнітних і теплових процесів індукційного нагрівання сталевий пластини проводилося за допомогою COMSOL Multiphysics, де зв'язок описується розсіюванням електромагнітної енергії як джерело тепла. Вибрано мультифізичний інтерфейс Induction Heating, при цьому до моделі автоматично додаються два фізичні інтерфейси: Magnetic Field і Heat Transfer in Solids. У розрахунках враховувалися залежності електромагнітних та теплофізичних властивостей матеріалу заготовки від температури. Геометричні розміри пластини становили (4×80×125) мм.

Виходячи з ефективності процесу нагрівання пластини, зазор між індуктором і пластиною, що нагрівається, повинен бути мінімальним. Проте, що менше цей зазор, то з більшою точністю необхідно виготовляти деталі індуктора, і навіть механізми, що працюють для встановлення заготовок в індуктор. Причому їхня загальна точність конструкції повинна підтримуватися в період експлуатації.

Таким чином, зменшуючи зазор, ми підвищуємо корисну потужність індуктора, проте це може призвести до підвищення вартості обладнання (зниження рентабельності) та ускладнення процесу виробництва. Тому оптимальна відстань від індуктора до пластини становить 6 мм. Параметри струму варіювали в діапазоні (300÷700) А.

Обговорення результатів. В результаті імітаційного моделювання визначено розподіл температури в сталевій пластині при індукційному нагріванні в інтервалі зміни сили струму (рис. 2).

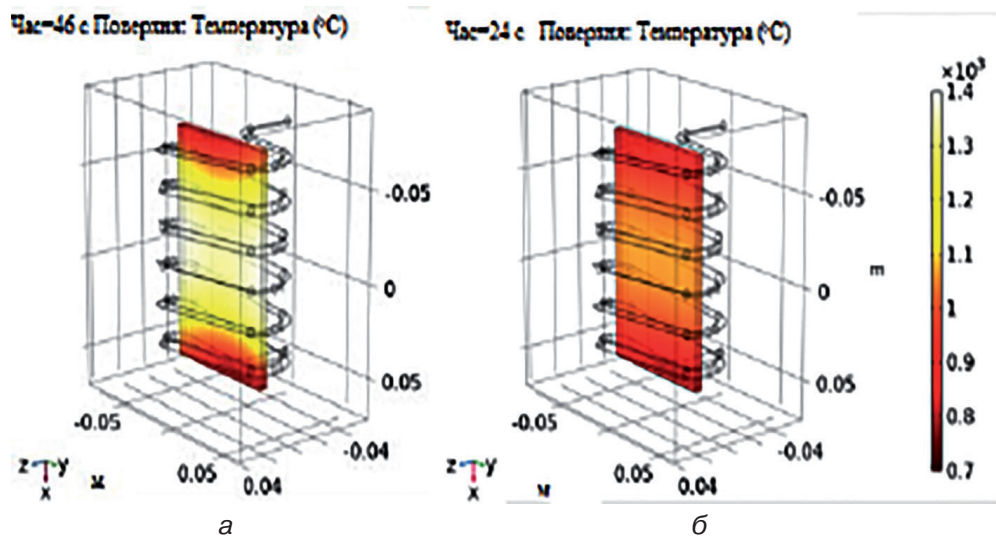


Рис. 2. Поле температур заготовки при індукційному нагріванні із силою струму 500 А: а – після нагрівання протягом $t_{\text{heat}} = 46$ с, б – після нагрівання плюс охолодження протягом $t_{\text{cooling}} = 24$ с

Результати моделювання показали, що максимальному нагріванню зазнають бічні грані заготовки в області охоплення їх витками індуктора (рис. 2, а). Грані, не охоплені витками, нагріваються менше. Час нагріву (t_{heat}) до температур, близьких до 1400 °С, при силі струму 500 А становило 46 с. Визначено точки з максимальною та мінімальною температурою на поверхні заготовки (рис. 3). Висока нерівномірність розподілу температури після нагрівання визначається параметром

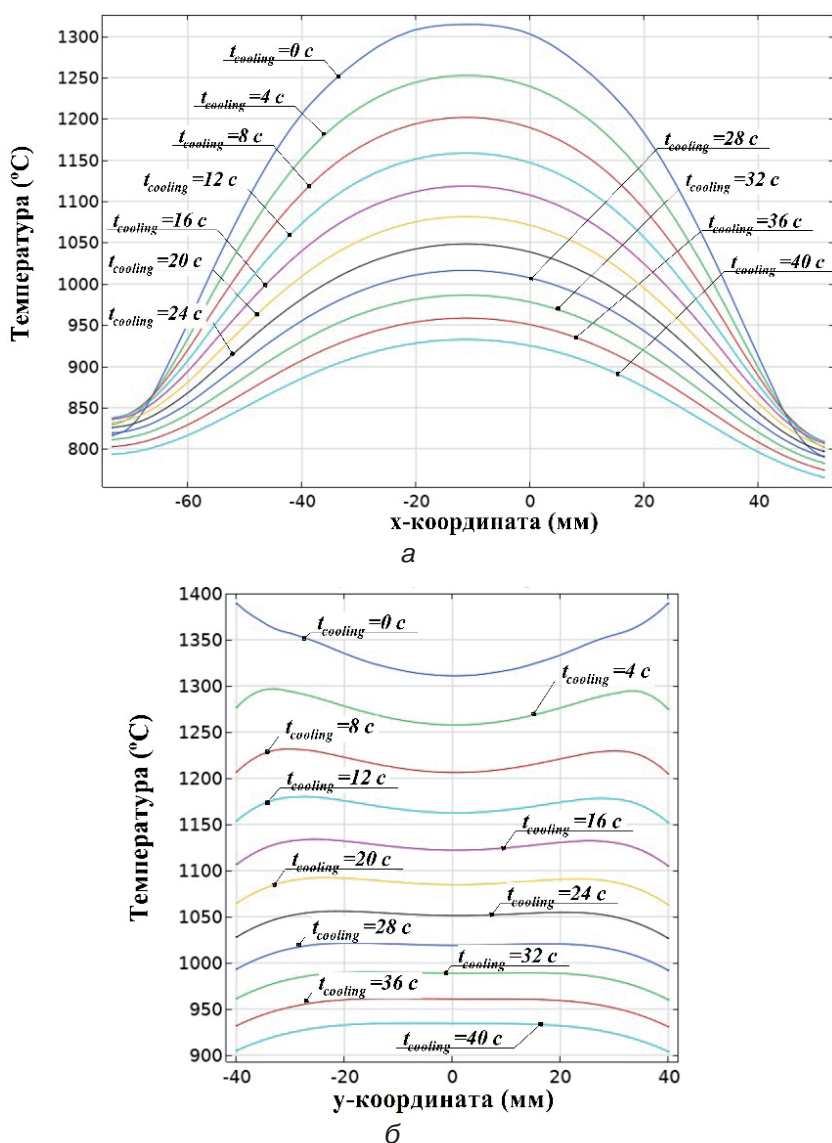


Рис. 3. Залежність зміни температури вздовж осей ОХ (а) та ОУ (б) на поверхні заготовки від часу охолодження (сила струму в процесі індукційного нагрівання $I = 500$ А)

різниці температур найбільш і найменш нагрітої області поверхні заготовки ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$) і становить 632 °С.

У процесі охолодження пластини (рис. 2, б) відбувається перерозподіл температури, яка зростає у верхній, центральній і нижній областях заготовки і знижується поблизу бічних її граней. При цьому різниця між температурою в найбільш гарячій і холодній точках на поверхні заготовки за період охолодження ($t_{cooling} = 24$ с) після її нагрівання зменшується з 632 до 225 °С (рис. 3). Мінімальне значення температури на поверхні заготовки перевищує 820 °С, що відповідає необхідним вимогам.

Характер зміни температурного поля зі збільшенням сили струму до 700 А не змінюється і має таку ж тенденцію, як і при нагріванні струмом 500 А. Проте це призводить до підвищення інтенсивності нагріву сталеві заготовки та зменшення часу нагріву до $17,5$ с. Різниця температур (ΔT) збільшується до 775 °С, проте мінімальне значення температури не досягає 800 °С навіть в умовах вирівнювання

температури при подальшому охолодженні. Таким чином, даний режим відповідає вимогам одержання якісного з'єднання в заданому часовому інтервалі.

Зниження сили струму до 300 А сприяє зменшенню нерівномірності нагрівання сталевोї заготовки. Час нагріву (t_{heat}) внаслідок невисокої інтенсивності електромагнітного поля зростає до 180 с. При цьому температура заготовки перебуває у інтервалі 830...1130 °С. Подальше збільшення часу нагріву не призводить до підвищення температури, лише уповільнює процес. В інтервалі часу охолодження (t_{cooling}) 0...18 с мінімальна температура заготовки (T_{min}) знижується від 830 до 820 °С. Таким чином, технологічний інтервал часу транспортування заготовки та заливки розплаву в умовах індукційного нагріву силою струму 300 А становить від 8 до 18 с.

Ще одним важливим фактором, що визначає стан протікання дифузійних процесів при взаємодії твердої заготовки з розплавом, є температура заливки. Процес заливання відбувається в період охолодження заготовки після її попереднього індукційного нагріву, а при подачі розплаву на заготовку її температура підвищиться на величину $\frac{1}{2}$ різниці між температурою заливки і заготовкою. В якості температури заготовки обрано усереднену температуру всієї її поверхні залежно від заданих часових параметрів обробки. Позначимо цей параметр T_{connect} і визначимо його як залежність:

$$T_{\text{connect}} = (T_{\text{зар}} + T_{\text{зал}})/2,$$

де $T_{\text{зар}}$ – температура заготовки, °С, $T_{\text{зал}}$ – температура заливки розплаву, °С.

Крім того, чим вища температура заливки, тим вище ця величина. Однак, нераціональне підвищення температури заливки може призвести до дефектів ливарного характеру, що є неприпустимим. Проведені в роботі моделювання та експериментальні дослідження з виготовлення тришарового виробу чавун-сталь-чавун показали, що ця величина повинна перебувати в інтервалі наступних значень:

- для сірого чавуну $1040\text{ °С} \geq T_{\text{connect}} \leq 1300\text{ °С}$;
- для білого чавуну $1090\text{ °С} \geq T_{\text{connect}} \leq 1325\text{ °С}$;

Таким чином, визначено, що гарантоване з'єднання шарів за представленою технологією забезпечується при дотриманні режимів нагріву в інтервалі значень

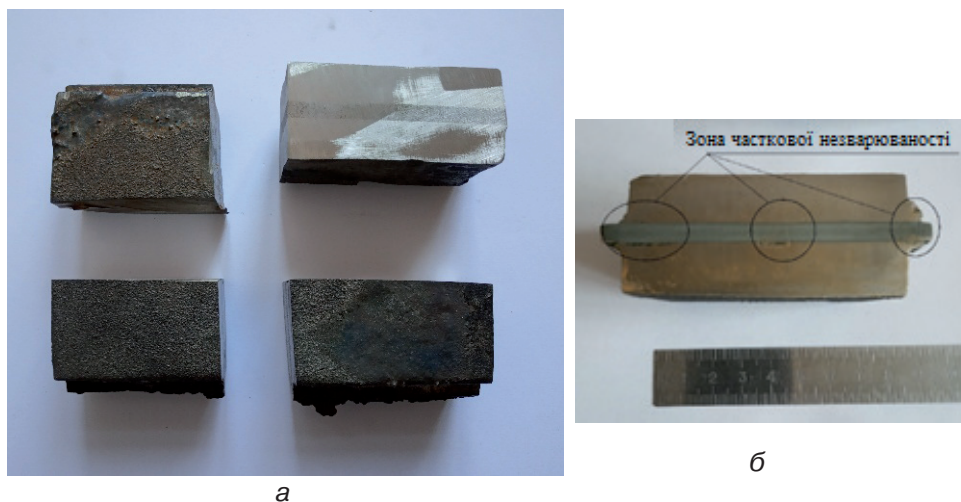


Рис. 4. Фрагменти тришарових виробів, одержаних литтям у форми, виготовлені за CO_2 – процесом, із застосуванням попереднього індукційного нагріву сталевої заготовки: а – сила струму 500А, час нагріву 46 с, час на транспортування та приміщення у ливарну форму – 12 с; б – сила струму 700А, час нагріву 36 с, час на транспортування та приміщення у ливарну форму – 15 с

сили струму 300...500 А, проведенні процесів транспортування заготовки та заливки розплаву в інтервалі 8...18 с, виконанні умов збереження температури системи заготовка-розплав T_{connect} у заданому інтервалі.

Практична реалізація. За запропонованими режимами нагрівання сталеві заготовки проведено дослідно-промислові випробування. Температура розплаву, що заливається в ливарну форму, виготовлену за CO_2 – процесом, становила $1420 \div 1430$ °С. На рис. 4 показані деякі приклади отриманих результатів із застосуванням комбінованої ливарно-індукційної технології виготовлення тришарових виробів. Використання рекомендованих режимів індукційної обробки (сила струму в інтервалі 300...500 А з частотою 60 кГц) забезпечує якісний зв'язок між сталевією заготовкою та робочим шаром (рис. 4, а).

Відхилення від рекомендованих параметрів призводять до утворення зон часткової або повної незварюваності, а також газових пор (рис. 4, б).

Висновки

- Розроблено спосіб та технологічна схема комбінованого використання індукційного нагріву сталевієї заготовки високочастотним електромагнітним полем у ливарному процесі одержання тришарових виробів чавун-сталь-чавун.

- Встановлено залежність зміни температури заготовки від сили струму; визначено часові технологічні параметри процесу нагрівання та охолодження заготовки, а також заливання розплаву. Доведено достовірність та надійність проведених математичних розрахунків для визначення рекомендованих режимів комбінованої ливарно-індукційної технології виготовлення тришарових виробів.

- Одержані методом імітаційного моделювання та теоретичних розрахунків результати дослідження розподілу температури при індукційному нагріванні сталевієї заготовки були апробовані у процесі дослідно-промислових випробувань.

- Результати проведених випробувань підтвердили застосування комбінованої ливарно-індукційної технології для виготовлення тришарових виробів.

References

- 1 Xu, J., Gao, X., Jiang, Z., Wei, D., & Jiao, S. (2016). Microstructure and hot deformation behaviour of high-carbon steel/low-carbon steel bimetal prepared by centrifugal composite casting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 817–827. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-8232-6>
- 2 Kostenko, G. D., Brechko, E. L., Pelikan, O. A., Kostenko, D. G., Bolgar, S. A., & Klimenko, L. M. (2003). Thermophysical peculiarities of preparation process of bimetallic castings on the iron alloys base. *Litejnoe Proizvodstvo*, 9, 19–22.
- 3 Zhou, L., Jingwei, Z., Fanghui, J., Qingfeng, Z., Xiaojun, L., Sihai, J., & Zhengyi, J. (2018). Analysis of bending characteristics of bimetal steel composite. *International Journal of Mechanical Sciences*, 148, 272–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.032>
- 4 Mola, R., & Bucki, T. (2018). The Microstructure and Properties of the Bimetallic AZ91/AlSi17 Joint Produced by Compound Casting. *Archives of Foundry Engineering*, 18(1), 71–76. <https://doi.org/10.24425/118814>
- 5 Yanyang, G., Xiaowei, W., Guoxiong, R., Zepeng, L., Ruidi, Y., Xiao, Y., & Peng, D. (2022). Microstructure and properties of copper-steel bimetallic sheets prepared by friction stir additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 689–699. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.022>
- 6 Powell, J., & Green, S. (2021). The challenges of bonding composite materials and some innovative solutions. *Reinforced Plastics*, 65, 36–39.
- 7 Xingjian, G., Zhengyi, J., Dongbin, W., Sihai, J., Dengfu, C., Jianzhong, X., Xiaoming, Z., & Dianyao, G. (2014). Effects of temperature and strain rate on microstructure and mechanical properties of high chromium cast iron/low carbon steel bimetal prepared by hot diffusion-compression bonding. *Materials & Design*, 63, 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.067>

- 8 Bykov, A. A. (2011). Bimetal production and applications. *Steel in Translation*, 41, 778–786. <https://doi.org/10.3103/S096709121109004X>
- 9 Wang, H., & Wang, Y. (2019). High-Velocity Impact Welding Process: A Review. *Metals*, 9(2), 144. <https://doi.org/10.3390/met9020144>
- 10 Findik, F. (2011). Recent developments in explosive welding. *Materials & Design*, 32(3), 1081–1093. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.017>
- 11 Bina, M. H., Dehghani, F., & Salimi, M. (2013). Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel. *Materials & Design*, 45, 504–509. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.037>
- 12 Kwiecien, I., Bobrowski, P., Janusz-Skuza, M., Wierzbicka-Miernik, A., Tarasek, A., Szulc, Z., & Wojewoda-Budka, J. (2020). Interface Characterization of Ni/Al Bimetallic Explosively Welded Plate Manufactured with Application of Exceptionally High Detonation Speed. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29, 6286–6294. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05117-w>
- 13 Bo, P., Jinchuan, J., Mingfei, W., Bowen, D., Xianlong, W., Shunyu, L., & Tingju, L. (2022). Microstructure characteristics and deformation behavior of tin bronze/1010 steel bimetal layered composite by continuous solid/liquid bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 844, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143155>
- 14 Kumar, N., Yuan, W., & Mishra, R. S. (2015). Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys. In *Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials*. Elsevier, 43–69. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802418-8.00003-5>
- 15 Mironov, S., Sato, Y. S., & Kokawa, H. (2020). Grain Structure Evolution during Friction-Stir Welding. *Physical Mesomechanics*, 23, 21–31. <http://doi.org/10.1134/S1029959920010038>
- 16 Kolařík, L., Kolaříková, M., & Janovec, J. (2016). Electroslag cladding of stainless austenitic layer by strip electrode, METAL 2016–25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, Czech Republic.
- 17 Argirov, C., & Kalchevska, K. (2021). Studies on bimetallic ingots for armour by the methods of non-destructive testing. Machines. *Technologies. Materials*, 15(3), 107–109.
- 18 Kuskov, Y. M., Zhdanov, V. A., Proskudin, V. N., & Netyaga, A. V. (2021). Production of Bimetallic Reinforcing Elements Using Electroslag Cladding for Hardening of Products of the Mining and Smelting Industry. *Steel in Translation*, 51, 267–269. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040070>
- 19 Lihoshva, V. P., Shmatko, A. V., Savin, V. V., Savina, L. A., & Tymoshenko, A. N. (2019). The dynamic of cooling of cast iron in the crystallizer in condition of the semi-continuous production process bimetallic band “steel-cast iron”. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 656, 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/656/1/012030>

Received 04.11.2022

A. M. Tymoshenko, PhD (Engin.), Senior Researcher.; e-mail: Marschal@i.ua,
ORCID 0000-0003-4038-1744

V. P. Lihoshva, Dr. Sci. (Engin.), prof. e-mail plazer_v@i.ua,
ORCID 0000-0003-3396-9793

O. V. Shmatko, Junior Researcher.; e-mail: blacknorfolk@gmail.com,
ORCID 0000-0002-7694-4142

O. A. Pelikan, Researcher, e-mail: otmlp@ptima.kiev.ua, ORCID 0000-0001-5156-4269

R. F. Likhatskyi, Postgraduate Student.; e-mail: richardlihatskyi@gmail.com,
ORCID 0000-0001-8277-5122

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE COMBINED FOUNDRY-INDUCTION METHOD OF PRODUCING THREE-LAYER CASTINGS

Abstract. The technological features of developed casting-induction method for obtaining three-layer «cast iron-steel-cast iron» castings were studied. The specified method consists in the use of induction heating of a steel billet with a high-frequency electromagnetic field in the casting process for obtaining three-layer products. The paper represents mathematical modeling results of temperature fields distribution under the action of electromagnetic fields on a steel workpiece. The main regularities of steel billet temperature changes depending from the current level and heating time have been established. As a result of simulation modeling, the technological parameters of the steel workpiece heating and cooling process were determined, as well as the pouring of the melt during the production of three-layer castings. Obtained dependences between temperature of the poured melt and temperature of the workpiece are necessary to ensure a high-quality connection between the steel inner part and working layer made of cast iron. The results of the experimental testing confirmed the adequacy of the mathematical modeling of the thermal state of the workpiece, as well as the effectiveness of using the developed combined casting-induction method for obtaining three-layer castings.

Keywords: induction casting method, induction heating, simulation modeling, three-layer casting, electromagnetic field, melt.