

УДК 621.375.826:621

Підвищення ефективності виготовлення і якості біметалевих матеріалів комбінованими лазерно-ливарними процесами

Салій С.С., Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С.

КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анотація: У даному дослідженні нікелевий сплав марки ХН60ВТ+Мо та сталь Ст3 були з'єднанні за допомогою комбінованого лазерно-ливарного процесу. На першому етапі на поверхні функціонального нікелевого сплаву за допомогою сфокусованого лазерного променя здійснювалось формування регулярного макрорельєфу наперед визначеними геометричними формою та розмірами. Далі заформовували у піщану форму зразки та заливали перегрітий розплав другого компоненту біметалу зі сторони нанесених регулярних макроструктур. Вплив температури заливання та нанесеного регулярного макрорельєфу на перехідну зону з'єднання оцінювали за допомогою світлової та скануючої(растрової) мікроскопії, методів енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS), рентгеноструктурного фазового аналізу та тестів на мікротвердість. Перед проведенням експерименту було проведено моделювання температурного поля у двофазовому середовищі в процесі сплавлення біметалу. Результати показують, що за рахунок зміни форми виступів регулярної топографії на поверхні функціонального шару можна керувати тепловідводом в зоні сплавлення.

Внаслідок такого локального підвищення температури в зоні сплавлення утворюється надійне з'єднання складових. Встановлено, що вирішальну роль на формування високоякісної структури біметалу з плавним градієнтом властивостей відіграють оптимальні значення висоти виступів і величини кроку між ними, які в даному випадку становлять 0,5 мм і 1,5 мм відповідно.

Ключові слова: біметал; комбінований процес; розплав; нікелевий сплав; математичне моделювання; металургійний зв'язок; мікроструктура; розподіл елементів; фазовий склад.

Одною із основних проблем виходу із ладу компонентів обладнання, що працюють в агресивному середовищі є корозійне та абразивне зношування, до таких можна віднести реактори, резервуари, теплообмінники та трубопроводи в енергетичній, хімічній, нафтопереробній промисловостях [1–3]. В основному сплави, які можуть забезпечити певну стійкість до корозії в агресивному середовищі мають високу вартість. Однак немає необхідності виготовляти весь компонент з корозійно-стійкого матеріалу, а лише його поверхню, яка має прямий контакт з агресивним середовищем, який у більшості випадків не перевищує 4-5 мм. Підхід, який варто розглянути, полягає у використанні порівняно недорогого матеріалу (наприклад, нелегованої сталі) та плакуванням його шаром корозійно-стійкого сплаву, такого як нержавіюча сталь або нікелевий сплав, що забезпечує можливість роботи в агресивному середовищі. Це рішення дозволяє значно зменшити витрати на промислове обладнання в залежності від технології виготовлення [4–8].

Розроблений комбінований лазерно-ливарний процес в НТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»[9], який може забезпечити значну конкуренцію загальноновживаним технологіям [10–15], заснований на методі підготовки порожнини ливарної форми[16], при якому елемент, який є робочим(функціональним) шаром вилівка, розміщується у формі у вигляді монолітної вставки безпосередньо перед заливанням розплавленого металу конструктивної складової(рис.1). Даний спосіб окрім економічних переваг не створює умов для розвитку пор та тріщин у перехідній зоні плавлення.

Основною задачею в даній роботі були теоретичні та експериментальні дослідження підвищення ефективності і якості виготовлення біметалів застосуванням комбінованих лазерно-ливарних процесів, при якому буде забезпечуватися металургійний зв'язок між його складовими.

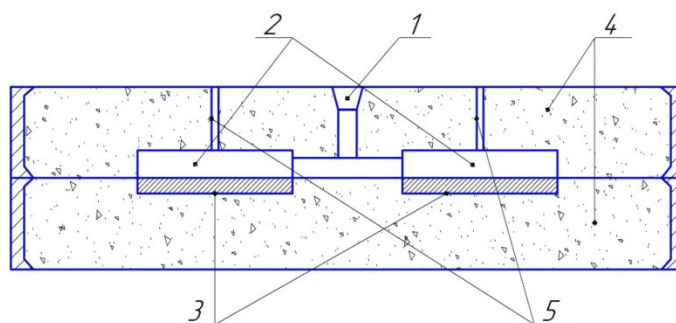


Рис. 1. Технологічна схема лиття біметалу із попередньо заформованими у литтєву форму підготовлених пластин функціонального шару, де 1- отвір для заливання та канал по якому прямую розплав, 2 – порожнина для конструктивного компоненту біметалу, 3 – підготовлені пластини функціонального складу, 4 – верхня та нижні опоки піщаної форми, 5 – технологічні отвори

Оскільки під час заливання розплавленим металом високі температури і середовище призводить до утворення на поверхнях з'єднання окисних плівок на межі з'єднання, які погіршують умови зчеплення шарів. Для подолання цього недоліку на поверхні функціональної складової біметалу зі сторони заливання за допомогою лазерної обробки формується регулярний макрорельєф у вигляді виступів квадратної форми з поперечними розмірами 1x1 мм. Висота виступів на всіх зразках становила $h = 0,5; 1,0; 1,5$ мм, крок між виступами по двом координатам становив 1,0; 1,5 і 2,0 мм.

Проводилось моделювання розподілу температур, зміни положення і форми міжфазної границі за допомогою методу рухомої границі відповідно до задачі Стефана в програмному пакеті «Comsol Multiphysics» v.5.5. у зоні сплавлення складових біметалу. Даний процес адаптований у відповідності із оригінальними дослідженнями в [17, 18].

На Рис.2 показана еволюція поля температури і геометрії міжфазної границі при взаємодії рідкої та твердої фаз компонентів досліджуваної області у різні моменти часу. Починаючи з 4 секунди температура на поверхні виступів перевищує температуру плавлення твердого компоненту і знаходиться в межах 1740-1750°K, далі відбувається активна деградація профілю виступів, яка триває до 12 с.

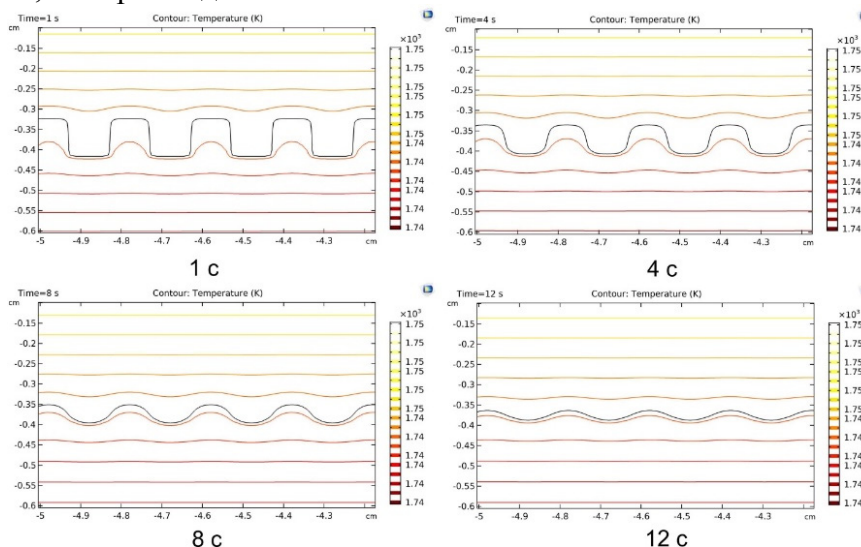


Рис.2. Температурні контури теплових потоків та межа фаз в області розрахунку в різні моменти часу від початку взаємодії з розплавом температурою 1873°K

Зразки з нікелевого сплаву розміщували у піщаній формі, як це показано на рис.1, нагрівали до температури 300 °С та витримували в печі 3 години. Розплав конструктивної складової біметалу сталі Ст.3, перегрітої до температури 1873°K (1600 °С), через окрему ливникову систему подавався на поверхню зразків. Після заливки зразки разом з формою охолоджувались на протязі 4 годин. Концентрація вуглецю в сталі Ст.3 становила 0,30 мас. %.

Отримані біметали, розмірами 100x50x10 мм, які пройшли механічні випробування розрізались електроіскровим методом вздовж вилівка на зразки, з яких виготовлялись мікрошліфи за стандартною методикою. Для виявлення мікроструктури мікрошліфи піддавались травленню спеціальним розчином «Мураками» та 3% розчином азотної кислоти в етиловому спирті, час травлення 10 с.

Значний інтерес представляють зони сплавлення складових біметалу, що мали місце в 98% від загальної кількості зон контакту, де конфігурація регулярних макроструктур була $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм (b – інтервал, h – висота) (Рис.3) і які забезпечують металургійний зв'язок між ними.

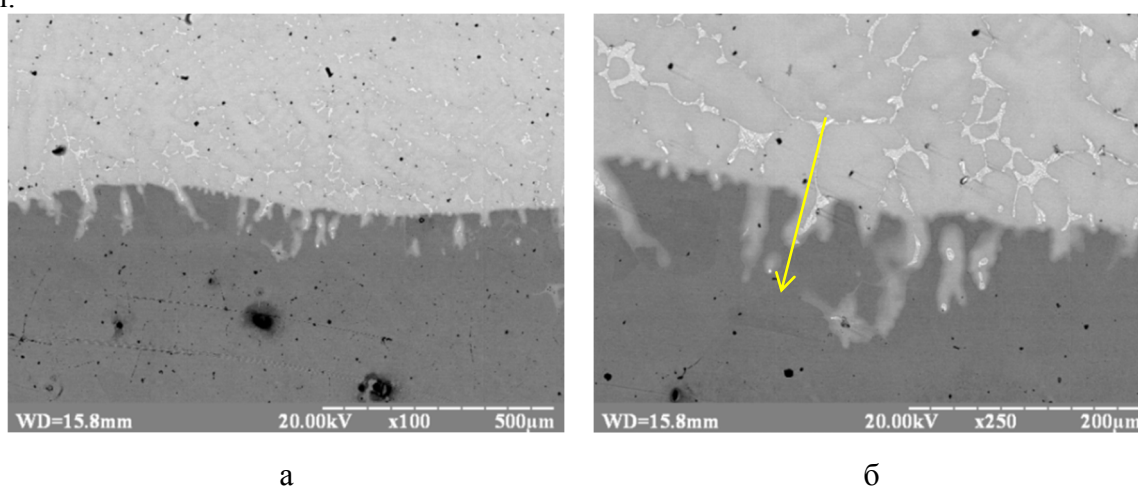


Рис.3. Фотографії мікроструктур зон з'єднання зразка $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм біметалу нікелевий сплав – сталь Ст.3, з висотою виступів 0,5мм і кроком 1,5 мм при збільшеннях: 100x - а, 250x - б

Наведене свідчить, що виступи на функціональній складовій практично повністю розплавившись, внаслідок чого утворився розчин нікелевого сплаву у вуглецевій сталі. Границя розділу розмита і має хвилясту форму, що обумовлено геометрією виступів, які були на поверхні нікелевого сплаву до взаємодії з розплавом.

На фотографіях мікроструктур чітко виділяються два шари. У верхній її частині розташований шар, мікроструктура якого практично не проявляється при обробці звичайними реактивами і належить вона нікелевому сплаву. Межує з ним ферито-перлітна структура вуглецевої сталі Ст.3 (Рис.3 а,б). При збільшенні на межі зі структурою вуглецевої сталі і на окремих її ділянках проявляються скупчення зерен білого кольору і різних розмірів, які також погано піддаються травленню і містять підвищену кількість Cr, Ni і W (рис.3(б)). Спостерігаються дифузійні процеси (вздовж жовтого маркеру рис. 3б) внаслідок розлегутання нікелевого сплаву напрямлені у сталь Ст3 глибиною в середньому 250-320 мкм (Рис.4а).

На рисунку 4б наведено дифрактограму, зняту з ділянки поперечного перерізу біметалу діаметром 6 мм симетричну відносно умовної лінії з'єднання нікелевого сплаву з макрорельєфом 1,5x0,5 зі сталю Ст.3.

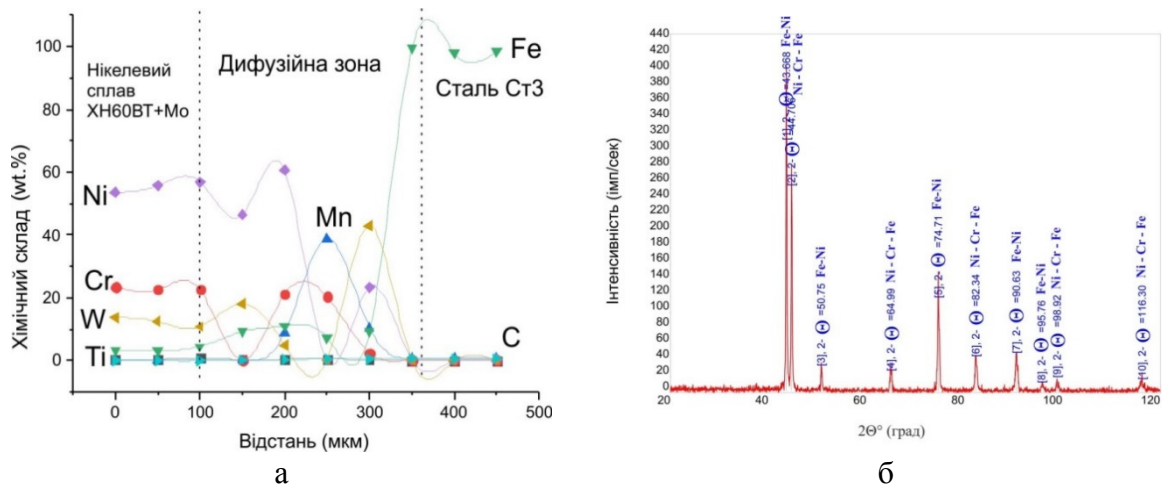


Рис.4. Розподіл хімічних елементів (а) та дифрактограма (б) у перехідному шарі зони сплавлення біметалу із параметрами макрорельєфу $b \times h = (1,5 \times 0,5)$ мм біметалу

Слід відзначити, що вміст фази Ni - Cr - Fe у наплавленому шарі становить 86.4%, що обумовлено більшими розмірами і однорідністю структури зон сплавлення. Цьому свідчить також підвищена кількість фази Fe 0.507 – Ni 0.493 (тетратаєніту) 13.6 %.

На шліфах зразків біметалів, функціональна складова яких мала макрорельєф (1,5x0,5) мм, визначався розподіл мікротвердості в напрямку перпендикулярному зоні з'єднання від поверхні до вуглецевої сталі при навантаженні 50г. На Рис.5 представлені результати вимірювання мікротвердості, значення якої достатньо плавно зменшуються від 5–6 ГПа у нікелевому сплаві, потім плавно підвищується до 6,8–7 в зоні сплавлення і складає 3–4 ГПа у вуглецевій сталі.

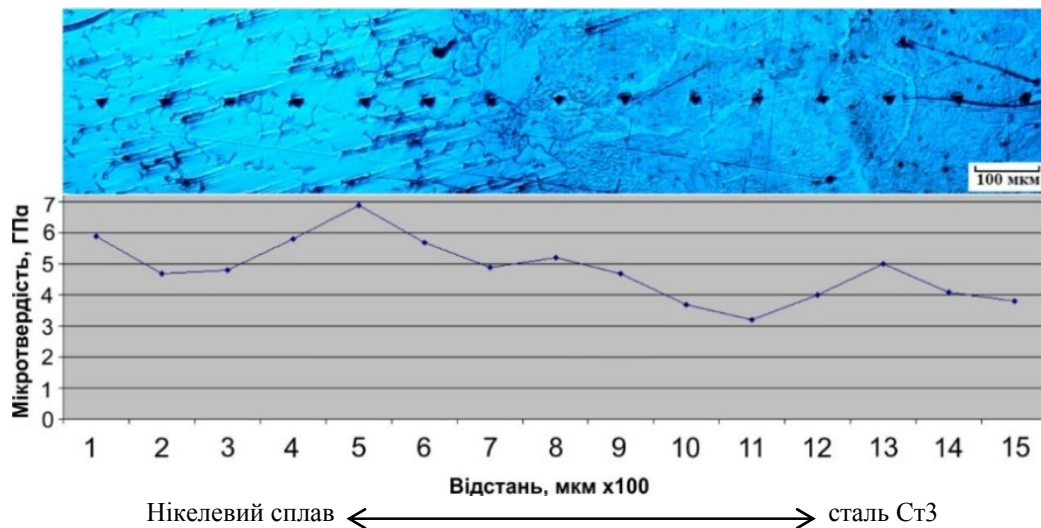


Рис. 5. Розподіл мікротвердості поперек зони сплавлення нікелевого сплаву і вуглецевої сталі Ст.3

Висновки

Реалізовано комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів ХН60ВТ+Мо – Сталь Ст3 товщиною 10мм, який не має аналогів, відрізняється високою продуктивністю і якістю виробів при визначеній конфігурації регулярного макрорельєфу,

висоти виступів і величини кроку між ними, які в даному випадку становлять 0,5 мм і 1,5 мм відповідно, конкурентоспроможною собівартістю та можливістю повної автоматизації.

Моделюванням визначено температуру розплаву конструкційної складової (при сталому об'ємі) необхідну для поетапного розплавлення вершин виступів з різними геометричними параметрами на функціональній складовій. Співставлення результатів моделювання з даними вибіркового експериментальних досліджень показав, що розбіг отриманих результатів не перевищував 15%.

Доведено, що в зоні сплавлення складових біметалу нікелевого сплаву і сталі Ст.3 утворюється перехідний шар, що містить до 86.4% фази Ni - Cr - Fe і фази Fe 0.507 - Ni 0.493 (тетратаєніту) 13.6 %.

Наведені структурно-фазові зміни добре корелюють з результатами вимірювання мікротвердості, яка в частині нікелевого сплаву, що розташована ближче до основи становить 4,5–5 ГПа, в перехідному повільно підвищується до 6,8–7 ГПа, а потім також повільно зменшується до 3–4 ГПа, тобто вихідної мікротвердості вуглецевої сталі.

Список літератури

1. Okonkwo, P. C., Mohamed, A. M. A. Erosion-corrosion in oil and gas industry: a review. *Int. J. Metall. Mater. Sci. Eng.* 2014. Vol. 4, No. 3. С. 7–28.
2. Tomarov, G. V., Shipkov, A. A. Erosion-corrosion of metals in multicomponent geothermal flows. *Thermal engineering.* 2006. Vol. 53, No. 3. С. 188–194.
3. Karlsdóttir, S. N., Hjaltason, S. M., Ragnarsdóttir, K. R. Corrosion behavior of materials in hydrogen sulfide abatement system at Hellisheiði geothermal power plant. *Geothermics.* 2017. Vol. 70. С. 222–229.
4. Kosturek, R., Wachowski, M., Śniezek, L., et al. The effects of the heat treatment on the microstructure of Inconel 625/steel bimetal joint obtained by explosive welding: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 18. С. 1007.
5. Lykshosha, V., Savina, L. A., Savin, V. V., et al. The Application of the Hybrid Method the Powder-Laser-Casting Technology for Production of Porous Alloys Based on Aluminum: *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, Trans Tech Publ,* 19. С. 11–15.
6. Durejko, T., Ziętała, M., Polkowski, W., et al. Thin wall tubes with Fe3Al/SS316L graded structure obtained by using laser engineered net shaping technology. *Materials & Design.* 2014. Vol. 63. С. 766–774.
7. Przyszlak, N., Wróbel, T. Self-hardening of X46Cr13 Steel Integrated with Base from Grey Cast Iron in Bimetallic System. *Archives of Foundry Engineering.* 2019.
8. Kosturek, R., Wachowski, M., Śniezek, L., et al. The influence of the post-weld heat treatment on the microstructure of inconel 625/carbon steel bimetal joint obtained by explosive welding. *Metals.* 2019. Vol. 9, No. 2. С. 246.
9. Салій, С. С., Головка, Л. Ф., Романенко, В. В., et al. Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів. *Mechanics and Advanced Technologies.* 2020. Vol. 88, No. 1.
10. Белый, А. И. Влияние основных технологических параметров плазменной наплавки на свойства композиционного наплавленного металла. *Автоматическая сварка.* 2010. No. 6. С. 30–32.
11. Шаповалов, К. П., Белинский, В. А., Мерзляков, А. Е., et al. Электрошлаковая сварка крупногабаритной станины прессы. *Автоматическая сварка.* 2016.
12. Шмидт, М., Курынцев, С. В. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавным швом. *Автоматическая сварка.* 2014. No. 4. С. 47–51.
13. Походня, И. К., Шлепаков, В. Н., Максимов, С. Ю., et al. Исследования и разработки ИЭС им. ЕО Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор). *Автоматическая сварка.* 2010. No. 12. С. 34–42.
14. Rigal, E., Bulet, H. Method for assembling by diffusion welding a martensite stainless steel and a copper alloy and resulting bimetal element / Google Patents, 2002.
15. Chen, Y., Nakata, K. Friction stir lap welding of magnesium alloy and zinc-coated steel. *Materials transactions.* 2009. Vol. 50, No. 11. С. 2598–2603.
16. Wróbel, T., Cholewa, M., Tenerowicz, S. Bimetallic layered castings alloy steel-carbon cast steel. *Archives of Foundry Engineering.* 2011. Vol. 11, No. 1. С. 105–107.
17. Wolff, F., Viskanta, R. Solidification of a pure metal at a vertical wall in the presence of liquid superheat. *International journal of heat and mass transfer.* 1988. Vol. 31, No. 8. С. 1735–1744.
18. Alexiades, V., Hannoun, N., Mai, T. Z. Tin melting: Effect of grid size and scheme on the numerical solution. *Electronic Journal of Differential Equations (EJDE)[electronic only].* 2003. Vol. 2003. С. 55–69.

IMPROVING PRODUCTION EFFICIENCY AND QUALITY OF BIMETALLIC MATERIALS BY COMBINED LASER-CASTING PROCESSES

Salii S., Golovko L., Romanenko V., Bloschchysyn M.

Abstract. In this study, nickel alloy grade KhN60VT + Mo and steel St3 were bonded using a combined laser-casting process. At the first stage, a regular macrorelief was formed on the surface of a functional nickel alloy using a focused laser beam in front of certain geometrical shapes and sizes. Then the samples were molded into a sandy mold and the superheated melt of the second bimetal component was poured from the side of the applied regular macrostructures. The effect of the pouring temperature and the applied regular macrorelief on the fusion zone of the joint was assessed using light and scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) methods, X-ray phase analysis, and microhardness tests. Before the experiment, the temperature field was simulated in a two-phase medium in the process of bimetal fusion. The results show that by changing the shape of the protrusions of regular topography on the surface of the functional layer, it is possible to control thermal conductivity in the fusion zone.

As a result of this local temperature rise, a reliable connection of the components is formed in the fusion zone. It has been found that the main role in the formation of a high-quality bimetal structure with a smooth gradient of properties is executed by the optimal values of the height of the protrusions and the size of the step between them, which in this case are 0.5 mm and 1.5 mm, respectively.

Keywords: bimetal; combined process; melt; nickel alloy; mathematical modeling; metallurgical bond; microstructure; distribution of elements; phase composition.