

УДК 533.951.8: 621.74.046

О.П. Шатрава, канд. техн. наук, пров. наук. співроб;

e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua

В.П. Лихошва, д-р техн. наук, проф., завідувач відділу;

e-mail: plazer_v@ukr.net

М.О. Кудрявченко, наук. співроб.; e-mail: plazer_v@ukr.net

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

ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНО-ІНДУКЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЛИТИХ БІМЕТАЛІЧНИХ ВИРОБІВ

Метою досліджень була розробка новітнього методу виробництва біметалевих виробів за допомогою рідкофазного з'єднання різномірних металевих сплавів для отримання плоских біметалічних конструкцій на основі використання ливарних процесів, лазерної обробки та індукційного нагрівання. Виходячи із цих передумов, автори запропонували новий лазерно-індукційний ливарний метод виробництва біметалевих матеріалів, що дозволяє отримати якісні з'єднання різномірних залізвуглецевих та кольорових сплавів. Проведено дослідження з оптимізації методів нагрівання металевих пластин під дією лазерного випромінювання та електромагнітного поля для створення умов формування біметалевих плоских конструкцій із різномірних матеріалів, а також здійснено пошук структурно-фазових відмінностей у вихідних та кінцевих сплавах та в перехідних шарах між ними. Наведено схему експериментальної лабораторної установки, яка передбачає попереднє нагрівання заготовки, що рухається в електромагнітному полі, яке створює індуктор до температур 800–1100 °С, а також подальше нагрівання лазерним випромінюванням до температури плавлення поверхні сталеві заготовки (1450–1520 °С) і подальшої подачі металевого розплаву в зону обробки та формування біметалевої конструкції з різномірних сплавів. Представлено результати досліджень дії індукційного та лазерного нагрівання поверхні в окислювальному середовищі, що задовольняють умовам рідкофазного з'єднання при подальшому заливанні рідкого розплаву на поверхню заготовки на основі аналізу структурно-фазового стану перехідного шару. Здійснено структурно-фазові дослідження отриманих зразків в зоні перехідних шарів і визначено трансформації морфологічної структури складових залізвуглецевих та кольорових сплавів, які застосовувались у роботі. Основними результатами роботи є свідчення про формування морфології перехідних шарів, структурних змін у перехідному шарі, що забезпечують нерозривність, стійкість та міцність перехідного шару, а відповідно, і міцність конструкції при різних комбінаціях матеріалів.

Ключові слова: біметалеві конструкції, концентровані джерела енергії, лазерне випромінювання, індукційний нагрів, рідкий метал, біметалеві плоскі вироби.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку промислового виробництва характеризуються підвищеними вимогами до якості та експлуатаційних властивостей виробів. Розвиток техніки викликає необхідність створення матеріалів, які мають комплекс властивостей, що забезпечують високу міцність, корозійну стійкість, теплопровідність, жароміцність, зносостійкість та ін. Часто окремі метали та сплави не можуть забезпечити необхідний комплекс властивостей. Тому все ширшого застосування набувають шаруваті металеві композиції. Такі матеріали виготовляються за допомогою з'єднання різномірних металів у композицію, яка зберігає надійний зв'язок

складових при подальшій технологічній обробці і в умовах експлуатації [1–5]. До таких матеріалів належать біметали – шаруваті матеріали, що складаються з двох або більше металів та їх сплавів.

Починаючи з 1960-х років у ФТІМС НАН України були розроблені ливарні способи виготовлення біметалічних виробів із різних матеріалів [5–7]. Способи лиття біметалів простіші, порівняно з прокаткою, однак вони мають технологічні обмеження: погана заповнюваність металу вузьких зазорів між виливницею та пластинами, імовірність розплавлення металу пластин, неможливість отримання композицій із матеріалів, що утворюють легкоплавкі фазові стани [8–12].

У зв'язку зі зростанням вимог сучасної промисловості до виробництва деталей, що мають комплекс необхідних експлуатаційних властивостей, перед дослідниками постає потреба в пошуку та створенні комплексних (гібридних) методів отримання біметалів. Тому створення технологій отримання біметалевих і багатшарових виробів із використанням новітніх гібридних методів обробки мають гарну перспективу.

Автори [13–15] створили нові гібридні методи ливарно-лазерної та ливарно-плазмової обробки. Згадані методи засновані на принципі рідкофазного та рідко-твердофазного з'єднання з утворенням дифузійного або металургійного перехідного шару. Проте залишаються невирішеними низка питань, пов'язаних із продуктивністю й економічною конкурентоспроможністю вказаних методів обробки та з їх адаптацією до наявних технологічних процесів виробництва.

Виходячи з наведених передумов, у цій роботі автори запропонували новий лазерно-індукційний ливарний метод виробництва біметалевих матеріалів, що дозволяє отримати якісні з'єднання різнорідних залізовуглецевих та кольорових сплавів.

Матеріали та методи

За результатами попередніх робіт [13–15] як об'єкти досліджень обрано залізовуглецеві та кольорові промислові сплави. Як матеріал основи (підкладки) використано листову сталь марки Ст3, ГОСТ 380-2005.

Для отримання поверхневих твердих, зносостійких та антифрикційних шарів із розплаву під дією лазерного випромінювання та електроіндукційного поля використано сплави сірого СЧ30, ГОСТ 1412-85 та хромистого ЧХ16, ГОСТ 7769-82 чавуну, а також бронзи ОЦС Бр05Ц5С5, ГОСТ 613-79.

У результаті досліджень була розроблена схема експериментальної лабораторної установки (рис. 1), яка передбачає попереднє нагрівання заготовки (основи) 8, що рухається в напрямку стрілки, в електромагнітному полі, яке створює індуктор 12 до температур 800–1100 °С.

А також подальший нагрів лазерним випромінюванням 1 до температур плавлення поверхні сталеві заготовки (1450–1520 °С). Фокусуючий елемент 2 розміщено в соплі 3 у вертикальній осі. Також під час руху заготовки зі швидкістю v услід її руху відбувається подача металевого розплаву 5. Розплав подається за допомогою дозувального лотка 4, який розміщений під невеликим нахилом до поверхні заготовки. Для того щоб металевий розплав не розтікався на поверхні заготовки, передбачено обмежувачі 9, та локалізатор 11, які також забезпечують зберігання тепла, що утворюється під час нагрівання лазерним випромінюванням. Обробка відбувається у захисному газі (Аргоні), що подається в канал 10 сопла 3. Розплавлений метал 5 спрямовується в зону нагрівання заготовки 8 і формує на ній поверхневий шар 7, який затвердіває з розплаву 6.

Наглядно ця лабораторна установка представлена на фото (рис. 2) в умовах експериментальної дільниці. На рисунку показано всі вузли та механізми, розташовані безпосередньо біля зони обробки.

Під час проведення експериментальних досліджень передбачено послідовне нагрівання заготовки електромагнітним полем та лазерним випромінюванням. Товщина робочого шару, що утворюється на поверхні заготовки, передбачувалась в межах $h = 8–10$ мм.

У процесі досліджень потужність лазерного випромінювання (W_p) перебувала

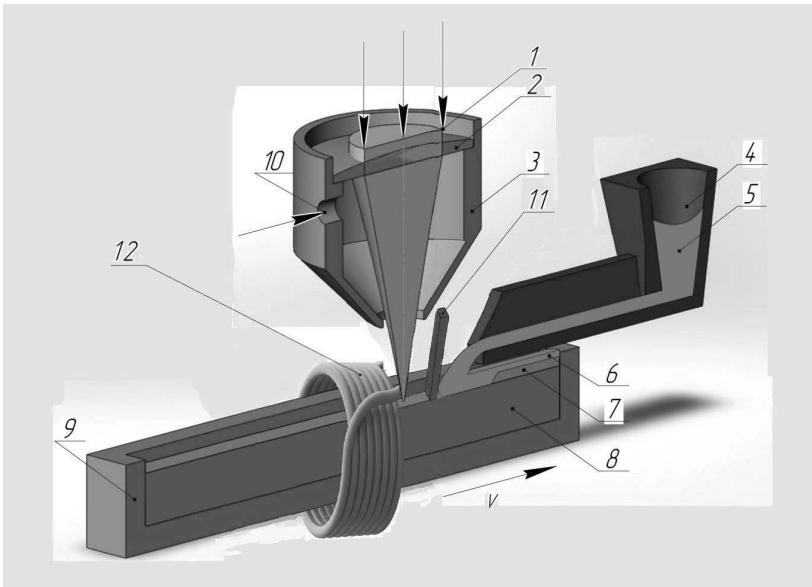


Рис. 1. Схема отримання біметалічної плоскої заготовки під дією лазерного випромінювання та індукційного нагрівання. 1 — лазерне випромінювання, 2 — фокусуючий елемент, 3 — сопло, 4 — дозуючий лоток, 5 — розплав металу, 6 — шар розплаву, що твердіє, 7 — шар відлитого металу, 8 — заготовка, 9 — обмежувачі, 10 — отвір подачі захисного газу, 11 — локалізатор, 12 — індуктор



Рис. 2. Фото лабораторної установки отримання біметалічної конструкції під дією лазерного випромінювання та індукційного нагрівання

в межах 600–800 Вт, діаметр плями фокусування (d_n) в межах 2–3 мм і швидкість переміщення оброблюваної поверхні (V) в межах 6–8 мм/с. При цьому рівень параметрів обробки заготовки в електромагнітному полі дії індуктора соленоїдного типу потужністю джерела живлення 40 кВт при силі струму 800–1000 А, частотою 66 кГц, дозволяли забезпечити її підігрів до температур 800–1100 °С.

Структурно-фазові дослідження отриманих біметалічних зразків проводили на оптичному мікроскопі «KarlZeissJena».

Твердість зразків вимірювали на приладі ТК-2 за методом Роквелла. Мікротвердість вимірювали на тих зразках, які готували для дослідження мікроструктури. Для визначення мікротвердості використовували пристрій типу ПМТ-3.

Результати та обговорення

При дослідженні біметалічних зразків велику увагу приділяли перехідному шару як найважливішому елементу біметалічної конструкції. Для сірого чавуну та сталі (рис. 3) перехідний шар виходив щільним по всій поверхні з'єднання, складався з вузького шару перліту з боку чавуну та ширшого шару перліту з боку сталі. Твердість сірого чавуну марки СЧ30 у вихідному стані становила менше 20 HRC, а після заливання цього чавуну на поверхню сталевий заготовки його твердість підвищувалася до 30 HRC за рахунок інтенсивного охолодження. Для підвищення властивостей робочого шару проводили його загартування з підвищенням твердості до 55 HRC.

У результаті нагрівання в поверхневому шарі сталі відбувається зміна його структури. Для деформованої сталі така дія супроводжується рекристалізацією та збільшенням розмірів зерен перліту та їх глобуляризацією. Аналіз мікроструктури показує, що мінімальна довжина зерен перліту збільшується до 6,1 мкм, а максимальна — до 27,3 мкм. У середньому збільшення довжини зерен перліту порівняно з вихідною сталлю складає 90 %. Ширина зерен перліту збільшується відповідно до 3,6–10,2 мкм, що в середньому в 2,2 разів більше, ніж у вихідній сталі. При цьому спостерігається зменшення значень коефіцієнта форми зерен перліту до 1,1–7,6, загалом до 2,9, що свідчить про підвищення ступеня глобуляризації структури сталі загалом на 76 %. При цьому середня відстань між зернами перліту збільшується до 83 мкм, що перевищує аналогічне значення для вихідної сталі на 80 %.

Сталь у зоні контакту із залитим чавуном має відманштетову структуру, що складається з голок фериту довжиною від 21,6 до 46,2 мкм (середня довжина — 31,1 мкм), товщиною від 3,4 до 4,4 мкм (середня товщина — 4,0 мкм) з коефіцієнтом форми від 4,9 до 10,7 (середнє значення — 7,8) та зерен перліту розміром від 9,1х11,4 до 9,8х20,2 мкм (середнє значення — 9,2х15,5 мкм) з коефіцієнтом форми від 1,5 до 1,7 (середнє значення — 1,8) (рис. 2.24). Відманштетова структура сталі контактує з перлітним прошарком завтовшки від 45,5 до 60,6 мкм (середнє значення — 49,6 мкм). Між перлітним прошарком та чавуном спостерігається зона обезуглерожування завтовшки від 3,6 до 7,2 мкм (середнє значення — 5,5 мкм). Мікроструктура чавуну в контактній зоні складається з перліту розміром від 14,7 до 19,2 мкм та коефіцієнтом форми 1,3, цементиту розміром від 1,3х2,0 до 2,8х6,9 мкм (середнє значення — 2,0х4,5 мкм) та коефіцієнтом форми від 1,6 до 2,4 (середнє значення — 2,0) та графіту розміром від 0,6х6,2 до 4,0х6,8 мкм (середнє значення — 2,3х6,5 мкм) та коефіцієнтом форми від 1,6 до 12,0 (середнє значення — 6,8).

У деяких зразках на межі початку шару чавуну, прилеглого до шару сталі, може формуватися вузький шар білого чавуну, у якому відсутній графіт і присутній мартенсит.

Перехідний шар чавуну та сталі щільний по всій довжині, складається з вузького шару перліту з боку чавуну та ширшого шару перліту з боку сталі (рис. 3). У ньому в деяких місцях та в невеликих кількостях можна спостерігати неметалеві включення оксидного типу.

Твердість вихідного литого хромистого чавуну ЧХ16 становила 49 HRC. Після заливки розплаву даного чавуну на заготовку зі Ст3 відбувалося зниження його твердості до 40 HRC. Після поверхне-

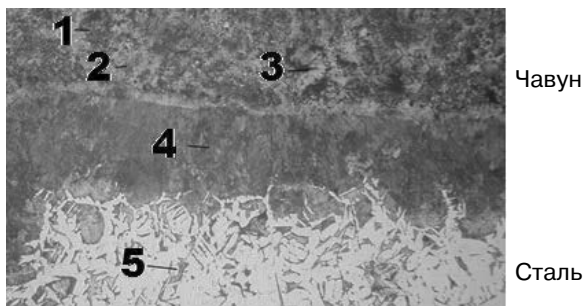
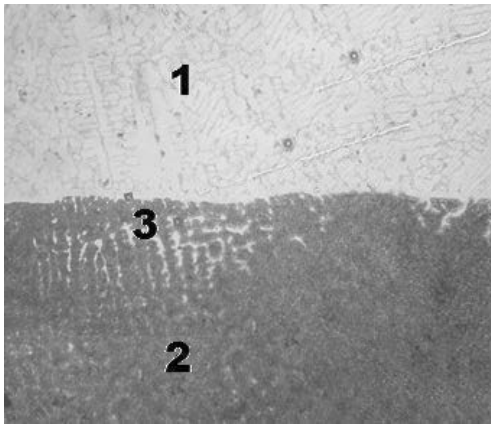


Рис. 3. Структура перехідного шару після травлення: 1 — перліт, 2 — цементит, 3 — графіт, 4 — перліт перехідного шару, 5 — зона оплавлення сталі, відманштеттова структура, $\times 300$

вого гарту суттєвого підвищення твердості залитого шару хромистого чавуну ЧХ16 не відбувалося (41 HRC). Для підвищення твердості робочого шару (хромистого чавуну) проводилось об'ємне загартування, яке призвело до підвищення твердості до 60–62 HRC.



Чавун

Сталь

Рис. 4. Структура перехідного шару при заливці чавуну ЧХ16 на сталь марки Ст3. $\times 375$: 1 — ЧХ16, 2 — Ст3, 3 — перехідний шар

У процесі формування біметалічної пари в результаті підвищеної швидкості охолодження поверхневий шар чавуну в районі перехідного шару є дисперсною структурою, що складається з голкоподібних карбідів розміром від $6,3 \times 91,1$ мкм до $21,2 \times 243,6$ мкм при середніх розмірах $12,2 \times 190,7$ мкм та коефіцієнті форми — 17,3, карбідної евтектики та ледебуриду (рис. 4). Перехідна зона з боку сталі та чавуну складається з перліту.

Унаслідок того, що поверхневі шари чавуну ЧХ16, залитого на Ст3, охолоджуються з високою швидкістю, на поверхні формується дисперсна дендритна структура.

Дендритні кристали складаються з гілок першого та другого порядку. Довжина і ширина гілок першого порядку дендритів змінюється відповідно від 72,1 до 165,3 мкм і від 5,4 до 11,7 мкм при середніх значеннях 108,5 і 9,4 мкм. Коефіцієнт форми гілок першого порядку дендритів змінюється від 76 до 214, при цьому середнє значення становить 124. Відстань між гілками першого порядку дендритів змінюється від 98 до 134 мкм при середньому значенні 108 мкм.

Перехідна зона між залитим шаром хромистого чавуну та сталі — щільна, але має суттєві відмінності із «перлітною» зоною перемішування сірого чавуну зі сталлю (рис. 4). При розплавленні поверхневого шару сталеві основи лазерним випромінюванням та заливання на неї хромистого чавуну відбувається перемішування сплавів і дифузія хрому з чавуну ЧХ16 у сталь. На рис. 4 видно, що в перехідній зоні розміром від 14,6 до 40,1 мкм, у середньому 22,5 мкм, структура сплаву складається зі світлих ділянок хромистого чавуну та бейніту сталі.

Мікротвердість чавуну в перехідному шарі та бейніті стали приблизно однакова і становить 645 кг/мм^2 . У той же час мікротвердість сталі поза зоною розплавлення приблизно відповідає твердості сорбіту.

З'єднання рідкої бронзи БрО5Ц5С5 з твердою заготовкою зі сталі 3 і отримання біметалічних зразків відбувалося з отриманням перехідних щільних шарів по всій лінії контакту. Структура залитого шару бронзи аналогічна її структурі в литому стані. Однак у процесі формування біметалічної конструкції спостерігалось диспергування структурних складових унаслідок підвищеної швидкості охолодження металу.

У результаті заливки рідкої бронзи БрО5Ц5С5 на розплавлену поверхню твердої заготовки зі сталі марки Ст3 отримані біметалічні зразки з хорошим з'єднанням шарів. Структурні дослідження шарів сталі та чавуну проведені порівняно з вихідними зразками.

Основні структурні складові обох матеріалів (рис. 5) поза зоною їх з'єднання не зазнають суттєвих змін порівняно з вихідними їх литими зразками.

Сталь, що не піддавалася нагріванню, як і в попередніх випадках, має дрібно-зернисту ферито-перлітну структуру.

Структура наплавленого шару бронзи аналогічна структурі в литому стані. Однак

спостерігається її диспергування внаслідок підвищеної швидкості охолодження шарів біметалічних виробів. Структура складається з дендритів — твердого розчину заміщення цинку, свинцю, олова в міді (рис. 5).

Довжина та ширина гілок першого порядку дендритів змінюється, відповідно, від 14,8 до 130,6 мкм та від 3,5 до 24,5 мкм при середніх значеннях 70,5 та 13,5 мкм. Коефіцієнт форми гілок першого порядку дендрит змінюється від 1,0 до 37,8, при цьому середнє значення становить 12,0. Відстань між гілками першого порядку дендритів змінюється від 99 до 217 мкм при середньому значенні 134 мкм.

Довжина й ширина гілок другого порядку дендритів змінюються відповідно, від 6,0 до 15,2 мкм і від 3,4 до 4,7 мкм, при середніх значеннях 8,9 і 4,0 мкм. Коефіцієнт форми гілок другого порядку дендрит змінюється від 1,3 до 4,5, при цьому середнє значення становить 2,3. Відстань між гілками другого порядку дендритів змінюється від 42 до 80 мкм, при середньому значенні 59 мкм.

По лінії контакту бронзи БрО5Ц5С5 та сталі марки Ст3 спостерігається щільна перехідна зона (рис. 5).

Мікроструктура сталі в районі перехідної зони є крупнозернистим «відманштетом». Відманштетова структура, що складається з голок фериту довжиною від 13,7 до 52,5 мкм (середня довжина — 33,7 мкм), товщиною від 5,1 до 9,5 мкм (середня товщина — 6,9 мкм) з коефіцієнтом форми від 2,0 до 10,3 (середнє значення — 5,2) та зерен перліту розміром від 6,9 x 21,9 до 19,9 x 27,0 мкм (середнє значення — 13,0 x 23,4 мкм) з коефіцієнтом форми від 1,1 до 3,9 (середнє значення — 2,2).

Висновки

- У результаті досліджень запропоновано новий метод рідкофазного з'єднання різнорідних залізовуглецевих та кольорових сплавів для отримання плоских біметалічних конструкцій на основі використання індукційного нагрівання, лазерної обробки та ливарних процесів. Метод передбачає синхронний рух заготовки, послідовний нагрів індуктором та лазерним випромінюванням і подальше з'єднання розплавленого металу із заготовкою..

- Даний метод з'єднання біметалічних пар із різнорідних матеріалів дозволяє створити передумови для отримання якісних і щільних перехідних шарів з відсутніми ливарними та хімічними дефектами. Структура перехідних шарів являє собою вузькі щільні зони між біметалевими парами, що свідчить про міцне з'єднання між ними.

- У роботі відзначаються переваги новітнього гібридного методу рідкофазного або рідко-твердофазного з'єднання різнорідних матеріалів, що дозволяє отримувати якісні біметалічні конструкції не тільки на основі залізовуглецевих сплавів (сталь — чавун), а й композицій чорних та кольорових сплавів (сталь — бронза).

- Основними результатами роботи є свідчення про формування морфології перехідних шарів, структурних змін у перехідному шарі, що забезпечують нерозривність, стійкість та міцність перехідного шару, а значить, і міцність конструкції при різних комбінаціях матеріалів.

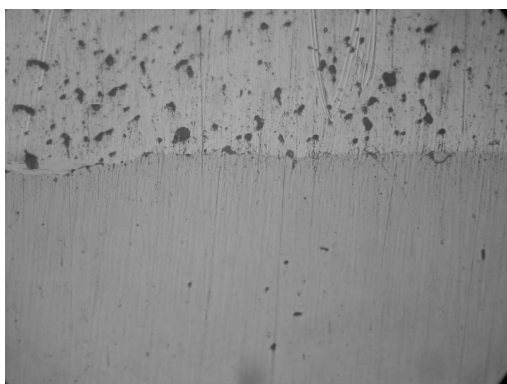


Рис. 5. Структура перехідного шару при заливці бронзи на сталь. x300

Список літератури

- 1 Склад В.О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии / Учебное пособие. Донецк.: ДонНТУ, 2014. 224 с.
- 2 Биметаллические материалы / Чепурко М.И., Остренко В.Я., Глускин Н.Я. и др. Ленинград: Судостроение, 1984. 272 с.
- 3 Сиротенко Л.Д., Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении. (Эл. журнал) *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2. ч. 1. С. 163–170.
- 4 Король В.К., Гиндельгорн М.С. Основы технологии производства многослойных металлов. Москва: Металлургия. 1970. 237 с.
- 5 A. Bykov Bimetal production and applications. *Steel in Translation*. 2011, Vol. 41, Is. 9. P. 778–786.
- 6 Литье биметаллических изделий / под ред. Снежко А.А., ИПЛ АН УССР. Киев. 1976. 122 с.
- 7 Состояние и перспективы развития биметаллического и многослойного литья. Сборник научных трудов / под ред. Г.Д. Костенко, ИПЛ АН УССР. Киев, 1991. 126 с.
- 8 Wrobel, Szajnar J. Bsmetallic casting ferritic stainless steel – grey cast iron. *Archives of metallurgy and materials*. Vol. 60. 2015. Issue 3 pp 2361-2365 <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0385>; e-ISSN 2300-1909.
- 9 Yuanhu Yi-qing, Chen Lili Huan-dong, Huzi-ang Zhu Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid–solid compound casting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol 26. Is. 6, June 2016, P. 1555–1563 [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64261-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64261-9)
- 10 Bai, S., Liu, J. Additive manufacturing of bimetallic structures. *SN Appl. Sci.* 2, 1152 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2918-6>
- 11 Wu, M., Yang, J., Huang, F. et al. Bonding of cast iron-aluminum in bimetallic castings by high-pressure die casting process. *Int J Adv Manuf Technol* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08816-x>
- 12 Liu, B., Sui, Ds., Guo, Zm. et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of bronze/steel bimetallic laminated composite prepared by protective atmosphere casting process. *China Foundry* 18, 497–504 (2021). <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1006>
- 13 Лихошва В.П., Шатрава А.П. Литейно-лазерное жидкофазное соединение разнородных материалов. Тез. докл. на VI междунар. науч.-практической конф. «Металлургия-2017». Запорожье. 2017. С. 164–165.
- 14 Лихошва В.П., Шматко А.П. Безперервний ливарно-плазмовий метод отримання біметалевих та багатшарових конструкцій. Тез. докл. на VI междунар. науч.-практической конф. «Металлургия-2017», Запорожье. 2017. С. 165–166
- 15 Лихошва В.П., Надашкевич Р.С. Новий прогресивний метод отримання біметалевих і багатшарових виробів. Тез. докл. на VI междунар. науч.-практической конф. «Металлургия-2017», Запорожье. 2017. С. 166–168.

Надійшла 26.03.2024

References

- 1 Sklyar V.O. Innovacionnie I resursosberegachie technologii v metallurgii (Innovative and resource-saving technologies in metallurgy) / Textbook. Donetsk: DonNTU, 2014. 224 p. [in Russian].
- 2 Bimetallicheskie materialy (Bimetallic materials) / Chepurko M.I., Ostrenko V.Ya., Gluskin N.Ya. et al. Leningrad: Shipbuilding, 1984. 272 p. [in Russian].

- 3 Syrotenko L.D., Shlykov E.S., Ablyaz T.R. Primenenie bimetallicheskykh materialov v mashinostroenii (Application of bimetallic materials in machine building)/ (Electronic journal) *Contemporary problems of science and education*. 2015. No. 2. part 1. [in Russian].
- 4 Korol V.K., Hindelhorn M.S. Osnovy technologii proizvodstva mnogosloynnykh metallov (Fundamentals of technology of production of multi-layer metals). Moskva: Metallurgy. 1970. 237 p. [in Russian].
- 5 Bykov Bimetal production and applications. *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41, Is. 9, P. 778–786.
- 6 Lite bimetallicheskykh izdeliy (Casting of bimetallic products). Sb. under the editorship Snezhko A.A., IPL Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Kyiv. 1976. 122p. [in Russian].
- 7 Sostoyanie i perspektivy razvitiya bimetallicheskogo i mnogosloynnogo litia (Status and prospects of development of bimetallic and multilayer casting). Collection of scientific works under the editorship. G.D. Kostenko, IPL Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Kyiv, 1991. 126 p. [in Russian].
- 8 Wrobel T., Szajnar J. Bsmetallic casting ferritic stainless steel – gray cast iron. *Archives of metallurgy and materials*. Vol. 60. 2015. Is. 3. P. 2361–2365 [https://DOI: 10.1515/amm-2015-0385](https://doi.org/10.1515/amm-2015-0385) ; e-ISSN 2300-1909
- 9 Yuanhu Yi-qing, Chen Lili Huan-dong, Huzi-ang Zhu Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid–solid compound casting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 26, Is. 6, June 2016, P. 1555–1563 [https://DOI:10.1016/S1003-6326\(16\)64261-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64261-9)
- 10 Bai S., Liu J. Additive manufacturing of bimetallic structures. *SN Appl. Sci.* 2, 1152 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2918-6>
- 11 Wu, M., Yang, J., Huang, F. et al. Bonding of cast iron-aluminum in bimetallic castings by high-pressure die casting process. *Int J Adv Manuf Technol* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08816-x>
- 12 Liu, B., Sui, Ds., Guo, Zm. et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of bronze/steel bimetallic laminated composite prepared by protective atmosphere casting process. *China Foundry* 18, 497–504 (2021). <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1006>
- 13 Lykhoshva V.P., Shatrava A.P. Liteyno-lasernoye zidkofaznoe soedinenie raznorodnich materialov (Foundry-laser liquid-phase joining of heterogeneous materials). Tez. acc. on the VI international scientific-practical conference «Metallurgy-2017». Zaporizhia. 2017. P. 164–165 [in Russian].
- 14 Lykhoshva V.P., Shmatko O.V. Bezperervniy livarno-plazmoviy metod otrimannya bimetalevich i bagatosharovich konstrukciy (Continuous casting-plasma method of obtaining bimetallic and multilayer structures). Thesis. acc. on the VI international scientific-practical conference «Metallurgy-2017», Zaporizhia. 2017. P. 165–166 [in Ukainian].
- 15 Lykhoshva V.P., Nadashkevich R.S. Noviy progresivniy metod otrimannya bimetalevich i bagatosharovich viribiv (A new progressive method of obtaining bimetallic and multi-layer products). Thesis. acc. on the VI international scientific-practical conference «Metallurgy-2017». Zaporizhia. 2017. P. 166–168 [in Ukainian].

Received 26.03.2024

A.P. Shatrava, Ph.D., leading science researcher; e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua

V.P. Likhoshva, Dr. Tech. Sciences, Prof., Head department; e-mail: plazer_v@ukr.net

M.O. Kudryavchenko, science. cooperation; e-mail: plazer_v@ukr.net

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

APPLICATION OF LASER-INDUCATION PROCESSING FOR THE PRODUCTION OF CAST BIMETALLIC PRODUCTS

The purpose of these studies was to develop the latest method of manufacturing bimetallic products using liquid-phase joining of dissimilar metal alloys to obtain flat bimetallic structures based on the use of casting processes, laser processing and induction heating. Based on these prerequisites, in this paper, the authors proposed a new laser-induction casting method for the production of bimetallic materials, which allows obtaining high-quality joints of dissimilar iron-carbon and non-ferrous alloys. In the work, research was conducted on the optimization of methods of heating metal plates under the action of laser radiation and an electromagnetic field to create conditions for the formation of bimetallic flat structures from dissimilar materials. A search for structural and phase differences in the initial and final alloys and in the transition layers between them was also carried out. The work presents a diagram of an experimental laboratory installation that involves preliminary heating of a billet moving in an electromagnetic field, which creates an inductor to temperatures of 800–1100 °C. As well as further heating by laser radiation to the melting temperature of the surface of the steel billet (1450–1520 °C). and subsequent supply of the metal melt to the processing zone and formation of a bimetallic structure from dissimilar alloys. The paper presents the results of research into the effect of induction and laser surface heating in an oxidizing medium, which satisfy the conditions of a liquid-phase connection with the subsequent pouring of a liquid melt onto the surface of the workpiece based on the analysis of the structural-phase state of the transition layer. Structural and phase studies of the obtained samples in the area of transitional layers were carried out and the transformations of the morphological structure of the components of the iron-carbon and non-ferrous alloys used in the work were determined. The main results of the work are evidence of the formation of the morphology of transition layers, structural changes in the transition layer, which ensure the integrity, stability and strength of the transition layer, and, accordingly, the strength of the structure with different combinations of materials.

Keywords: Bimetallic structures, concentrated energy sources, laser radiation, induction heating, liquid metal, bimetallic flat products.

До уваги авторів

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу прохання при подачі статей користуватися сайтом <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі Вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Для спілкування з редакцією та подання статей у перехідний період користуйтеся тільки ел. адресою: **plit.periodical@gmail.com**

Редакція журналу «Процеси лиття»