

ВПЛИВ МОДИФІКАТОРІВ РІЗНИХ ТИПІВ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ТИПУ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ 25Х5ФМС

І.О. Рябцев¹, А.А. Бабінець¹, М.О. Пашин¹, О.М. Сизоненко², І.П. Лентюгов¹, І.І. Рябцев¹, Т.Г. Соломійчук¹, А.С. Торпаков²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. 54018, м. Миколаїв, просп. Богоявленський, 43, а.

В роботі проведено порівняльний аналіз впливу модифікуючих добавок бору або карбідів титану на структуру та властивості металу, наплавленого порошковим електродним дротом ПП-Нп-25Х5ФМС. Показано, що введення добавок того або іншого модифікатора в кількості 0,01 % суттєво впливає на структуру наплавленого металу. При цьому їхній вплив на структуру до певної міри відрізняється. Модифікування бором призводить до суттєвого зменшення розмірів кристалітів, перерозподілу неметалічних включень і підвищення мікротвердості металу. На відміну від цього, введення мікродобавок карбідів титану в зварювальну ванну впливає на кінетику протікання кристалізації металу, завдяки чому відбувається усунення стовпчатості кристалітів і перетворення структури металу на коміркову. Показано, що завдяки значачним змінам структури зносостійкість та термостійкість металу, наплавленого із застосуванням обох типів модифікаторів, підвищується. Отримані результати можуть бути використані при виборі перспективних способів підвищення службових властивостей наплавлених деталей, які експлуатуються в умовах інтенсивних термосилових навантажень та зношування при терті метала по металу. Бібліогр. 11, рис. 4.

Ключові слова: дугове наплавлення, модифікування, мікролегування, наплавлений метал, порошковий дріт, зносостійкість, термостійкість, мікроструктура

Вступ. З технічної літератури відомо, що завдяки модифікуванню чи мікролегуванню сталей та сплавів, при яких відбувається подрібнювання розміру зерна, перерозподіл неметалічних включень, очищення меж зерен і т.ін., можливо суттєво впливати на структуру та експлуатаційні властивості цих металів. Для модифікування застосовують матеріали, які містять мікродобавки бору, вольфраму, титану та ін. [1–3]. Введення у сталі та сплави мікродобавок цих елементів, як правило, призводить до утворення великої кількості центрів кристалізації та впливає на співвідношення швидкостей зародження й росту кристалів, що, в свою чергу, впливає на механічні властивості металів. Разом з тим, управління структурою та властивостями металу шляхом його модифікування чи мікролегування досить обмежено використовується при наплавленні [3].

В окремих роботах, в основному спрямованих на вирішення практичних завдань, наводяться приклади застосування модифікаторів різних типів з метою підвищення службових властивостей деталей, які відрізняються умовами експлуатації, хімічним складом і т.п., тому такі дані важко порівнювати навіть для одного типу модифікатора [4–8]. Відомо про перспективність модифікування наплавленого металу мікродобавками бору [9] та

карбідів титану [10], які вводились в наплавлений метал через шихту порошкових дротів.

Метою даної роботи є проведення порівняльної експериментальної оцінки ефективності застосування модифікуючих добавок, які містять бор або карбіди титану, введених в однаковій кількості у шихту порошкових дротів, на структуру та службові властивості наплавленого металу типу теплостійкої інструментальної сталі 25Х5ФМС.

Матеріали та методики для досліджень. При виборі порошкового дроту для досліджень виходили з того, що порошковий дріт ПП-Нп-25Х5ФМС досить широко використовується при виготовленні та відновленні валків станів гарячої прокатки, штампів гарячого штампування, роликів МБЛЗ і т.п. деталей, які експлуатуються в умовах циклічних теплових змін у поєднанні зі зношуванням при терті метала по металу, а отже для них важливими є термостійкість та зносостійкість. При цьому саме наплавлений метал 25Х5ФМС характеризується високою довговічністю в умовах циклічного термосилового навантаження та зношування [11].

Модифікування наплавленого металу здійснювали шляхом введення порошків із відповідними добавками до шихти порошкових електродних дротів. Даний метод є достатньо технологічно простим і може успішно застосовуватися на прак-

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>,

Пашин М.О. Scopus Author ID 7801572218, Сизоненко О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8449-2481>,

Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>, Рябцев І.І. – <https://orcid.org/0000-0001-7550-1887>,

Соломійчук Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-7550-1887>, Торпаков А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3038-8291>

© І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, М.О. Пашин, О.М. Сизоненко, І.П. Лентюгов, І.І. Рябцев, Т.Г. Соломійчук, А.С. Торпаков, 2023

тиці [9]. Шихту порошкових дротів розраховували таким чином, щоб отримати однаковий вміст модифікуючих добавок в наплавленому металі на рівні 0,01 %. В якості вихідних шихтових матеріалів використовували лігатуру ФХБ-1, яка містить 12 % бору, а також порошок системи Ti–TiC із вмістом карбідів ≥ 23 %, отриманий обробкою високовольтним електричним розрядом порошку титану у вуглеводневій рідині [10]. Кількість та тип модифікаторів, які вводились в наплавлений метал, обирались виходячи із попередньо отриманих даних, з метою підвищення службових властивостей наплавленого металу та недопущення появи в ньому тріщин [9, 10].

Наплавлення дослідних зразків виконували порошковими дротами діаметром 1,8 мм під флюсом АН-26П. В якості основного металу використовували пластини зі сталі 40Х. Режими наплавлення: $I = 220$ А, $U = 36$ В, $V = 25$ м/год. Кожний зразок наплавляли в п'ять шарів для уникнення впливу перемішування наплавленого та основного металів. Для порівняння використовували зразки, наплавлені порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС стандартного складу без модифікуючих добавок.

Підготовку поверхні зразків для металографічних досліджень виконували за стандартними методами, які включають поетапне шліфування поверхні зразків з використанням алмазних паст різної дисперсності та наступне електролітичне травлення в 20%-му розчині хромової кислоти. Дослідження мікроструктури здійснювали на металографічному оптичному мікроскопі МІМ-7 з цифровим відеоокуляром Sigeta MCMOS-3100 при збільшеннях $\times 320$.

Оцінку службових властивостей наплавленого металу визначали експериментально по двом показникам – термостійкості та зносостійкості при підвищеній температурі. Для оцінки термостійкості наплавленого металу порівнювали два параметри – кількість циклів нагрівання-охолодження до появи сітки термічних тріщин на поверхні дослідного зразка і глибину їх розповсюдження по досягненню всіма зразками 200 циклів нагріву-охолодження. Температура поверхні

зразка при нагріванні становить 650 °С, при охолодженні – 60 °С.

Оцінку зносостійкості при підвищених температурах виконували при терті метал по металу по схемі «вал-площина». В процесі випробування наплавлена поверхня дослідного зразка зношується об розігріту до температури 950 °С поверхню кільця-контртіла. Температура на поверхні зразка в зоні контакту зразка та кільця становить близько 600 °С. Оцінку зносостійкості виконували по втраті маси дослідного зразка до і після випробувань.

В якості еталону при відпрацюванні режимів випробувань використовували зразки зі сталі 45, загартовані на твердість $HRC 48...52$. Отримані величини термостійкості та зносостійкості для зразків-еталонів приймали в якості умовної одиниці. Більш докладно методики досліджень службових властивостей наплавленого металу викладені в роботі [9].

Результати досліджень та їх обговорення.

Металографічні дослідження наплавлених зразків (рис. 1–3) показали, що застосування обох типів модифікаторів призводить до подрібнення структури наплавленого металу. Так, середній розмір кристалітів немодифікованого металу в його центральній частині становить $30...60$ мкм, у більшості – $40...45$ мкм. В металі, модифікованому бором, розмір кристалітів в аналогічній ділянці металу становить від 20 до 40 мкм, у більшості – $20...25$ мкм. В металі, модифікованому карбідами титану, середній розмір кристалітів становить $20...50$ мкм, у більшості – $30...35$ мкм.

Окрім розмірів кристалітів структура наплавленого металу зразка, який містить мікродобавки бору (рис. 2), несуттєво відрізняється від структури зразка немодифікованого металу (рис. 1), і складається із стовпчастих кристалітів, які ростуть у напрямку тепловідведення. У тілі кристалітів спостерігається голчаста мартенситна структура, а за їх межами – світлі виділення залишкового аустеніту. Наявні поодинокі виділення округлої форми в тілі кристалітів, які, очевидно, є складними карбоборидами. Мікротвердість в цій зоні у зразка з мікродобавками бору складає

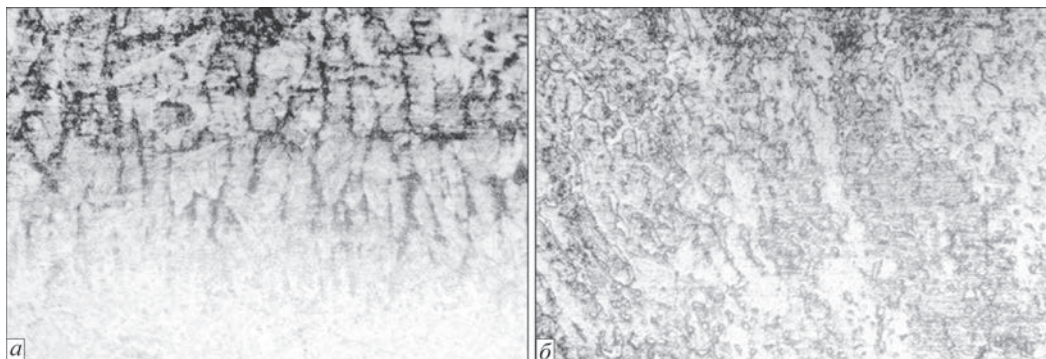


Рис. 1. Мікроструктура ($\times 320$) наплавленого металу 25Х5ФМС без модифікуючих добавок поблизу лінії сплавлення (а) та у верхній частині наплавленого металу (б)

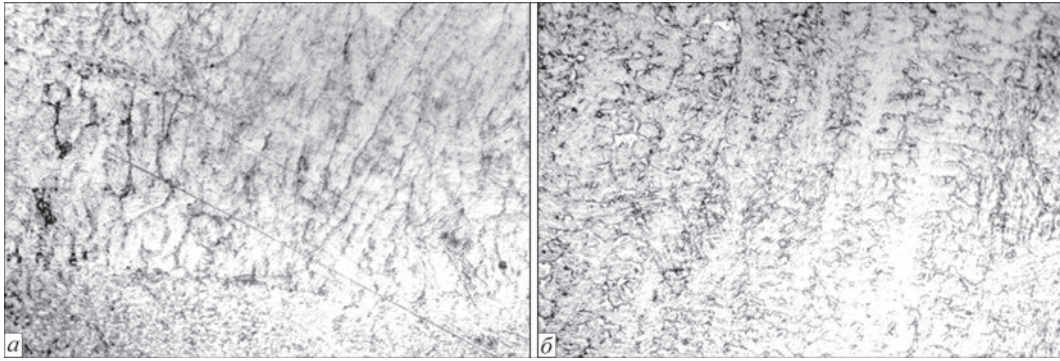


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 320$) наплавленого металу 25X5ФМС з мікродобавками бору поблизу лінії сплавлення (а) та у верхній частині наплавленого металу (б)

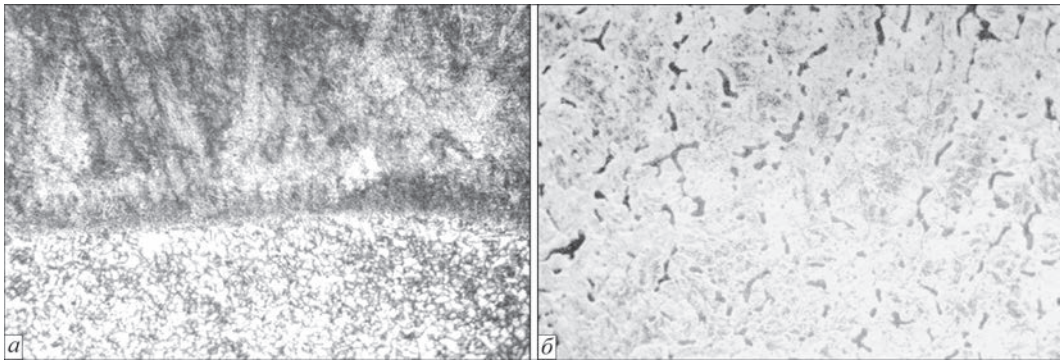


Рис. 3. Мікроструктура ($\times 320$) наплавленого металу 25X5ФМС з мікродобавками карбідів титану поблизу лінії сплавлення (а) та у верхній частині наплавленого металу (б)

$HV1 - 6130...6420$ МПа, що вище ніж мікротвердість аналогічної ділянки зразка без модифікуючих добавок ($HV1 - 5720...6060$ МПа).

У зразку, наплавленому дротом із вмістом модифікатора системи $Ti-TiC$, структура верхнього шару наплавленого металу складається з досить рівновісних комірок, по межах яких спостерігаються темнотравні виділення (рис. 3). Мікротвердість цієї ділянки наплавленого металу становить $HV1 - 5720...5850$ МПа. Вплив модифікуючих часток TiC , у порівнянні з бором, проявляється не стільки в подрібненні кристалітів, але у перетворенні мікроструктури наплавленого металу зі стовпчастої в коміркову та виділенні складних сполук за межами литих кристалітів у вигляді окремих включень. Мікротвердість наплавленого металу у порівнянні з немодифікованим зразком при цьому, практично, не змінюється.

Дослідження рівня забрудненості наплавлених зразків неметалічними включеннями відповідно до методики ГОСТ 1778-70 на полірованих не травлених мікрошліфах показали, що найбільше забруднення наплавленого металу, в основному оксидами, спостерігається в зразку без модифікуючих добавок – воно відповідає балу № 3а по таблиці «Оксидаи точкові». Зразки наплавленого металу, які були модифіковані мікродобавками бору, чистіші у порівнянні із зразком без добавок і їх забруднення відповідає балу № 1а тієї ж таблиці. Найменший рівень забрудненості неметалічними

включеннями, що складає менше бала № 1а, спостерігається в зразку, наплавленому із застосуванням модифікатора системи $Ti-TiC$.

Дослідження службових властивостей наплавлених зразків показало, що модифікування наплавленого металу бором дозволяє підвищити його твердість з $HRC 48...50$ до $HRC 52...54$. Твердість наплавленого металу, модифікованого $Ti-TiC$, практично не змінилася і становить $HRC 48...52$.

Результати експериментальних досліджень службових властивостей наплавленого металу наведені на рис. 4, де зазначені величини його зно-

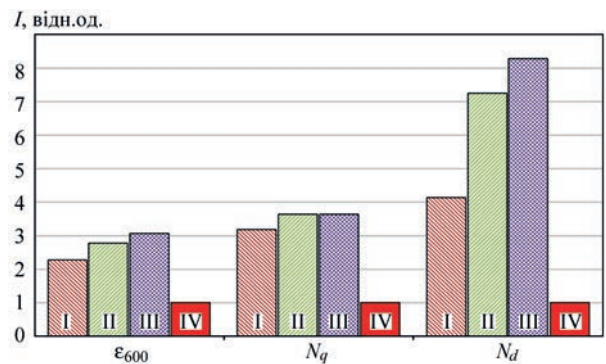


Рис. 4. Відносна зносостійкість наплавленого металу 25X5ФМС при підвищеній температурі (ϵ_{600}), відносна термостійкість за кількістю циклів до появи тріщин (N_q) та їх середньої довжини (N_d): без модифікуючих добавок (I), з модифікуючими добавками бору (II) та карбідів титану (III) у відношенні до еталону зі сталі 45 (IV), показники яких прийнято за одиницю.

состійкості при підвищеній температурі (ε_{600}), термостійкості за кількістю циклів до появи тріщин (N_q) та за їх середньою довжиною (N_d), дані у відношенні до відповідних характеристик зразків-еталонів, виготовлених зі сталі 45, показники яких прийнято за одиницю.

Як видно з рис. 4, термостійкість та зносостійкість зразків металу, наплавленого порошковими дротами із мікродобавками обох типів, підвищилась. Тріщини термічної втоми у модифікованому металі наплавлених зразків зароджуються пізніше, їхня середня довжина та кількість менша, ніж у зразках без модифікуючих добавок. Слід відзначити, що оцінка термічної стійкості, виконана по середній глибині розповсюдження тріщин, виявилась більш точною, аніж оцінка по кількості циклів до утворення розгалуженої сітки тріщин. Це пояснюється тим, що сталь 25X5ФМС характеризується досить високою термостійкістю, і візуальне визначення точного моменту появи розгалуженої сітки тріщин може давати похибки. Позитивний вплив введення в наплавлений метал мікродобавок обох типів відзначено не тільки у меншій втраті маси наплавлених зразків, але також і на зменшенні величини зносу кілець-контрол, які працюють в контакт з досліджуваними зразками, що означає про більш сприятливі умови експлуатації, які встановились в парах тертя.

Загалом, підвищення зносостійкості наплавленого металу із модифікуючими добавками обох типів знаходиться приблизно на однаковому рівні і становить від 22 до 34 % у порівнянні з немодифікованим металом. Підвищення термостійкості, оцінене по кількості циклів до появи тріщин, становить 20 % для обох типів модифікаторів, а у випадку оцінки по середній глибині тріщин становить від 75 % у випадку застосування бору та до 200 % у випадку застосування карбідів титану. Як бачимо, модифікування наплавленого металу мікродобавками порошку системи Ti–TiC більш позитивно впливає на його службові властивості.

На нашу думку, позитивний вплив модифікування мікродобавками бору на властивості наплавленого металу може бути пояснений декількома факторами. По-перше, бор є більш активним розкислювачем у порівнянні з кремнієм і марганцем, і має високу поверхневу активність. Завдяки цьому бор переважно розташовується по межах кристалітів, що призводить до перерозподілу неметалічних включень і витіснення їх із меж в об'єм кристалітів [6]. По-друге, модифікування наплавленого металу бором призводить до підвищення мікротвердості кристалітів, тоді як мікротвердість матриці залишається практично без змін, що може бути пояснене підвищенням щільності й розгалуженості зміцнених бором міжкристалічних меж.

Позитивний вплив мікродобавок порошку з карбідами титану на властивості наплавленого металу, очевидно, в першу чергу пов'язаний з високою температурою плавлення цих з'єднань (3260 ± 150 °C). Модифікування наплавленого металу цими сполуками призводить до того, що через своє незначне розчинення в зварювальній ванні вони ефективно переходять із шихти порошкового дроту у зварювальну ванну, впливаючи на кінетику кристалізації наплавленого металу. Завдяки цьому відбувається усунення стовпчастості кристалітів та подрібнювання їх розміру, що позитивно впливає на службові властивості наплавленого металу.

Висновки

1. Введення в наплавлений метал типу інструментальної сталі 25X5ФМС мікродобавок бору або карбідів титану в однаковій кількості (0,01 %) проявляє різний вплив на його структуру і призводить до значного подрібнення розмірів кристалітів та деякого підвищення мікротвердості його матриці у першому випадку та суттєвої зміни його структури із перетворенням стовпчастої в коміркову без суттєвої зміни розмірів кристалітів та мікротвердості – у другому.

2. Модифікування обома типами досліджених добавок позитивно впливає на службові властивості наплавленого металу, при цьому більш перспективно виглядає застосування у якості модифікатора порошку, який містить карбіди титану, що дозволяє підвищити зносостійкість та термостійкість наплавленого металу у 1,34 та 2,0 рази, відповідно.

Список літератури

1. Baker, T.N. (2016) Microalloyed steels. *Ironmaking & Steelmaking*, 43 (4), 264–307. DOI: 10.1179/1743281215Y.0000000063
2. Baker, T.N. (2019) Titanium microalloyed steels. *Ibid.* 46 (1), 1–55. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1446496>
3. Рябцев І.О., Бабінець А.А. (2021) Вплив модифікування та мікролегуювання на структуру та властивості наплавленого металу (Огляд). *Автоматичне зварювання*, 10, 3–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.10.01>
4. Gladkiy, P.V., Mikaelyan, G.S. (1992) *Mikrolegirovanie i modifitsirovanie iznosostoykogo naplavlennogo metalla. Microalloying and modification of wear-resistant weld metal. Sb. Naplavka. Tekhnologii, materialy, oborudovanie*. Kiev, IES im. E.O.Patona, 33–36.
5. Степнов К.К., Матвиенко В.Н., Олдаковский А.И. (2011) Модифицирование среднехромистого наплавленного металла. *Автоматическая сварка*, 8, 12–14.
6. Кривчиков С.Ю. (2012) Модифицирование бором наплавленного металла типа серого чугуна. *Там же*, 6, 28–31.
7. Максимов С.Ю., Мачуляк В.В., Шеремета А.В., Гончаренко Е.И. (2014) Исследование влияния микролегирования титаном и бором металла шва на его механические свойства при сварке под водой. *Там же*, 6-7, 79–82.
8. Syzonenko O.M., Prokhorenko S.V., Lyryan E.V. et al. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Materials Science*, 56 (2), 232–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>

9. Бабінець А.А., Рябцев І.О., Лентюгов І.П., Богайчук І.Л. (2022) Вплив мікролегуювання бором на структуру та властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС. *Автоматичне зварювання*, **6**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.06.01>
10. Лобанов Л.М., Сизоненко О.М., Рябцев І.О. та ін. (2023) Удосконалення технології виготовлення модифікаторів системи Ti–TiC та дослідження їх впливу на структуру наплавленого металу типу 25X5ФМС. *Там само*, **2**, 3–9.
11. Рябцев І.О., Книш В.В., Бабінець А.А., Соловей С.О. (2022) *Втомна довговічність наплавлених деталей*. Монографія. Київ, Інтерсервіс.
5. Stepnov, K.K., Matvienko, V.N., Oldakovsky, A.I. (2011) Modification of medium-chromium deposited metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 10-12.
6. Krivchikov, S.Yu. (2012) Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *The Paton Welding J.*, **6**, 19-21.
7. Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *The Paton Welding J.*, **6-7**, 76-79.
8. Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lypyan, E.V. et al. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Materials Sci.*, **56** (2), 232–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>
9. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O., Lentyugov, I.P., Bogaichuk, I.L. (2022) Influence of microalloying with boron on the structure and properties of deposited metal of the type of tool steel 25Kh5FMS. *The Paton Welding J.*, **6**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.06.01>.
10. Lobanov, L.M., Syzonenko, O.M., Ryabtsev, I.O. et al. (2023) Improvement of technology of producing Ti–TiC modifiers and studying their impact on the structure of deposited metal of type 25Kh5FMS. *The Paton Welding J.*, **2**, 3–9.
11. Ryabtsev, I.O., Knysh, V.V., Babinets, A.A., Solovei, S.O. (2022) *Fatigue life of deposited parts*. In: Monography. Kyiv, Interservice [in Ukrainian].

References

1. Baker, T.N. (2016) Microalloyed steels. *Ironmaking & Steelmaking*, **43** (4), 264–307. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.00000000063>
2. Baker, T.N. (2019) Titanium microalloyed steels. *Ibid.*, **46** (1), 1–55. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1446496>
3. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O. (2021) Influence of modification and microalloying on deposited metal structure and properties (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 3–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.10.01>
4. Gladkiy, P.V., Mikaelyan, G.S. (1992) *Microalloying and modification of wear-resistant deposited metal*. In: Surfacing. Technologies, Materials, Equipment. Kyiv, PWI, 33–36 [in Russian].

INFLUENCE OF DIFFERENT TYPES OF MODIFIERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEPOSITED METAL OF THE TYPE OF 25Kh5MFS TOOL STEEL

I.O. Ryabtsev¹, A.A. Babinets¹, M.O. Pashchin¹, O.M. Sizonenko², I.O. Lentyugov¹, I.I. Ryabtsev¹,
T.G. Solomijchuk¹, A.S. Torpakov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine. 43, a Bohoyavlenskyi Ave., 54018, Mykolayiv

Comparative analysis of the influence of modifying additives of boron or titanium carbides on the structure and properties of the metal deposited with PP-Np-25KhFMS flux-cored electrode wire was performed in this study. It is shown that addition of some modifier in the amount of 0.01% does not have any significant influence on the deposited metal structure. Their influence on the structure differs to a certain extent. Boron modifying leads to an essential reduction of the crystallite dimensions, redistribution of nonmetallic inclusions and increase of metal microhardness. Unlike that, introducing titanium carbide microadditives into the weld pool influences the kinetics of metal solidification, which results in elimination of crystallite columnarity and metal structure transformation into the cell one. It is shown that owing to the mentioned changes in the structure, the wear and heat resistance of the metal, deposited with application of both the types of modifiers, is increased. Obtained results can be used at selection of promising methods to improve the service properties of the surfaced parts, which operate under the conditions of thermal force loading and wear at metal friction against metal. 11 Ref., 4 Fig.

Keywords: arc surfacing, modifying, microalloying, deposited metal, flux-cored wire, heat resistance, microstructure

Надійшла до редакції 28.04.2023

НОВА КНИГА



«Позапічне оброблення сталі: способи, процеси, технології»: підручник для студ. спеціальності 136 «Металургія», освітньої програми «Комп'ютеризовані процеси лиття» / В.О. Шаповалов, Ф.К. Біктагіров, В.Г. Могилатенко; за ред. академіка І.В. Кривцуна. – К.: Хімджест, 2023. – 360 с.

У підручнику викладено наукові та прикладні аспекти різних процесів позапічної обробки сталі. Описані сучасні, найбільш прогресивні методи позапічної обробки сталі у рідкому стані, включаючи: вакуумування, оброблення інертними газами, порошкоподібними реагентами та шлаками у виливницях, ковшах і агрегатах типу ківш-піч з одночасним підігріванням рідкої сталі, як електричними, так і термохімічними джерелами теплової енергії. Викладені особливості роботи агрегатів, які знайшли застосування в промислових умовах заводів України та інших країн.

Підручник призначений для студентів спеціальності 136 «Металургія» освітньої програми «Комп'ютеризовані процеси лиття», може бути корисним для студентів, які навчаються за іншими освітніми програмами спеціальності, а також здобувачів третього наукового рівня освіти, викладачів металургійних спеціальностей вузів, наукових та інженерно-технічних працівників металургійних і машинобудівних підприємств.

Книга у відкритому доступі на сайті видавництва ІЕЗ ім. Є.О.Патона за посиланням

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/books>