

ВПЛИВ МІКРОЛЕГУВАННЯ БОРОМ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ТИПУ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ 25X5ФМС

А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов, І.Л. Богайчук

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

В роботі експериментально визначено вплив різної кількості мікродобавок бору на структуру та експлуатаційні властивості металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС, отриманого дуговим наплавленням дослідними порошковими дротами під флюсом. Мікролегуєчі добавки вводилися безпосередньо у шихту дослідних порошкових дротів при їх виготовленні. Визначено, що мікролегування наплавленого металу типу сталі 25X5ФМС бором у кількості 0,007...0,04 % не погіршує якість формування наплавлених валиків і відділення шлакової кірки. Водночас, при вмісті бору в наплавленому металі $\geq 0,02$ %, спостерігається утворення великої кількості кристалізаційних тріщин, що вкрай негативно впливає на його експлуатаційні властивості. При цьому експериментально встановлено, що введення мікродобавок бору у кількості 0,007...0,01 % до наплавленого металу типу 25X5ФМС приводить до підвищення його термостійкості та зносостійкості при підвищених температурах у 1,2...2,0 рази. При оптимальному вмісті мікролегуєчих добавок відбувається подрібнення структури наплавленого металу, деяке підвищення мікротвердості та, імовірно, утворення в матриці сплаву складних карбоборидів сферичної форми. З огляду на отримані дані, рекомендовано застосовувати бор в наплавленому металі типу інструментальної сталі 25X5ФМС в кількості 0,007...0,01 % з метою підвищення його експлуатаційних властивостей. Бібліогр. 12, табл. 4, рис. 11.

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

Вступ. Зараз в нашій країні та за кордоном розроблено велику кількість матеріалів у вигляді суцільних і порошкових дротів, стрічок та покритих електродів для дугового наплавлення деталей машин і механізмів, які експлуатуються в умовах різних видів зношування, циклічних механічних і термічних навантажень, корозії та ін. [1–5]. По суті, технічні та економічні можливості збільшити експлуатаційні властивості наплавленого металу шляхом звичайного додаткового легування електродних матеріалів практично вичерпані.

Великі можливості в управлінні структурою та властивостями наплавленого металу відкриває використання мікролегування і модифікування, які до теперішнього часу практично не використовуються в наплавлювальному виробництві [6, 7]. Відомі лише окремі роботи, в основному, спрямовані на вирішення практичних завдань, зокрема, наприклад, для наплавлення гребних валів морських суден [8] та інших деталей [9–11].

Метою даної роботи було дослідження впливу мікролегування бором на структуру та експлуатаційні властивості металу типа інструментальної напівтеплостійкої сталі 25X5ФМС, отриманого шляхом дугового наплавлення порошковими дротами з шихтою, що містить мікролегуєчі добавки.

Матеріали, які використовувалися для проведення досліджень. Для проведення експери-

ментів було розраховано шихтовий склад та виготовлено чотири дослідних порошкових дроти для наплавлення, що забезпечують отримання наплавленого металу типу інструментальної сталі 25X5ФМС. В якості мікролегуєчої добавки використовували лігатуру ФХБ-1, яка містить 12 % бору. Дану лігатуру у вигляді порошку додавали безпосередньо у шихту порошкових дротів при їх виготовленні з таким розрахунком, щоб отримати вміст бору у шихті порошкових дротів від 0,01 до 0,1 %. Як було показано в роботі [6], такий спосіб введення мікролегуєчих або модифікуючих добавок з технологічної та економічної точки зору є найбільш простим і раціональним при дуговому наплавленні. В якості еталону використовували порошковий дріт ПП-Нп-25X5ФМС без додавання мікролегуєчих добавок. Діаметр всіх розроблених дротів – 1,8 мм, коефіцієнт заповнення – 25 %. Наплавлення дослідних зразків виконували під флюсом АН-26П.

Методики та зразки для проведення досліджень експлуатаційних властивостей наплавленого металу. Інструменти гарячого деформування в процесі експлуатації, в основному, зношуються внаслідок тертя металу по металу при підвищених температурах. Крім того, в результаті періодичного контакту з нагрітими до високої температури заготовками в наплавленому металі можлива поява

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

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

© А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов, І.Л. Богайчук. 2022

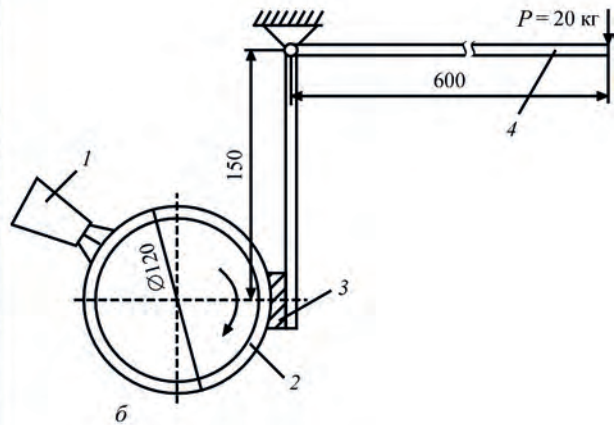
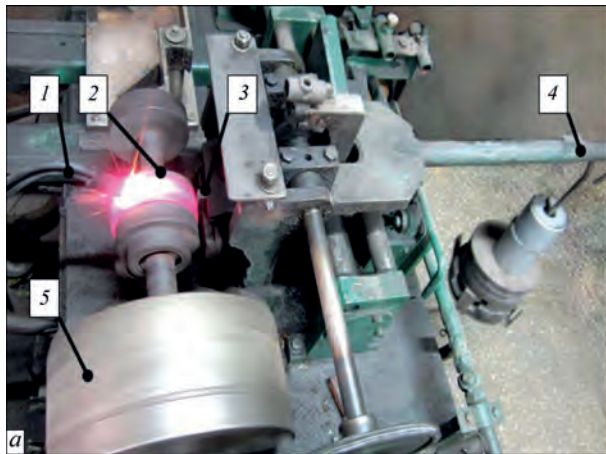


Рис. 1. Вигляд (а) та принципова схема (б) блока установки для дослідження зносостійкості наплавленого металу при терті металу по металу при підвищених температурах: 1 – газовий пальник для підігріву кільця (контргіла), що зношує зразок; 2 – кільце (контргіло); 3 – зразок, що зношується; 4 – важіль з вантажами для притискання зразка до кільця (контргіла); 5 – привід обертання кільця (контргіла)

тріщин термічної втоми. Для проведення досліджень зносостійкості при терті металу по металу при підвищених температурах та термічної стійкості наплавленого металу використовували дослідну блочно-модульну установку [12].

Методика дослідження зношування при терті металу по металу при підвищених температурах. До основних параметрів досліджень відносяться питомий тиск на випробуваний наплавлений зразок, температура нагрівання цього зразка, швидкість відносного переміщення елементів, що труться (швидкість тертя), матеріал кільця (контргіла), що зношує зразок, температура нагрівання кільця.

На рис. 1, а наведено фото блока установки, а на рис. 1, б принципова схема дослідження зносостійкості наплавленого металу при терті металу по металу при підвищених температурах. Співвідношення плечей важільного механізму при вантажі в 20 кг забезпечує притиск зразка до кільця, що зношує зразок, з зусиллям 800 Н. При дотику циліндричної поверхні нагрітого кільця з площиною зразка тиск у місці контакту визначається за формулою

$$P_{уд} = 0,798 \sqrt{\frac{\rho}{D \left(\frac{1-\mu^2}{E_1} + \frac{1-\mu^2}{E_2} \right)}}$$

де $\rho = P/l$; P – зусилля притискання (800 Н); l – ширина зразка (10 мм); D – діаметр кільця (120 мм).

Приймаючи значення коефіцієнта Пуассона та модулів пружності для нагрітої сталі та випробуваного зразка рівним відповідно $\mu = 0,3$; $E_1 = 25000$ МПа; $E_2 = 20000$ МПа, отримаємо значення питомого тиску 100 МПа. Швидкість тертя була 20...22 м/хв, що відповідає найбільш уживаним режимам при гарячій деформації металів.

Кільце, що зношує зразок, нагрівали газокисневим полум'ям. Завдяки строгому певному співвідношенню витрати газу і кисню, температура

кільця підтримувалася постійною – 950...980 °С, що періодично контролювали за допомогою оптичного пірометра. При цьому температура на поверхні зразка в зоні контакту зразка та кільця становила приблизно 600 °С. Зносостійкість зразка визначається по втраті маси до і після випробування, середнє значення якої розраховується по трьом зразкам одного типу.

Методика досліджень термостійкості наплавленого металу. При оцінці термостійкості повторювали цикли нагрівання та охолодження наплавлених зразків до появи тріщин термічної втоми або досягнення певного ступеня розтріскування. У цьому випадку мірою термічної стійкості є кількість циклів до досягнення цих показників. Блок установки для дослідження термостійкості наплавлених зразків наведено на рис. 2.

Зразок, що досліджується, встановлюють в оправці установки так, щоб його наплавлена шліфувана поверхня була направлена до джерела нагріву, в якості якого використовується газокисневий пальник. Привід зворотно-поступального руху забезпечує переміщення оправки із закріпленням у

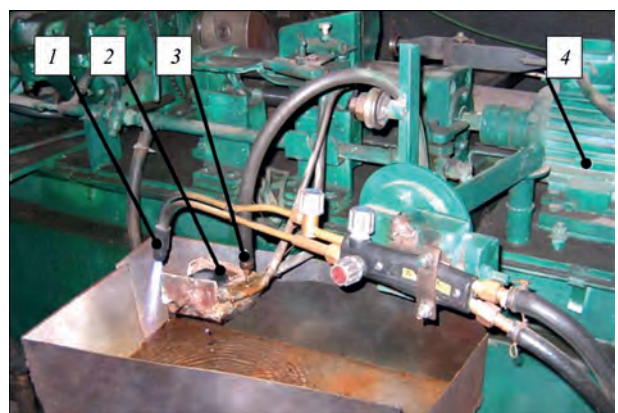


Рис. 2. Вигляд блока установки для дослідження термостійкості наплавлених зразків: 1 – газовий пальник для підігріву зразка; 2 – досліджуваний зразок; 3 – шланг для подачі води, що охолоджує зразок; 4 – привід переміщення зразка

ній зразком від джерела нагріву до місця, де проводиться охолодження зразка водою.

Рівномірне нагрівання газовим пальником виходить у плямі на поверхні зразка діаметром $\approx 15...20$ мм. Нагрів триває 12 с, охолодження струменем води – 8 с. За цих умов температура нагрівання поверхні зразка стабілізується до 10 циклу та перебуває в межах $630...690$ °С. Охолодження зразка водою проводиться до $60...80$ °С. Цикли нагрівання-охолодження повторюють до появи видимої неозброєним оком сітки термічних тріщин, після чого випробування зупиняли, наплавлена поверхня зразка зачищалася і фотографувалася.

Після цього, для визначення глибини і характеру розповсюдження термічних тріщин в наплавленому металі, зразки всіх типів продовжували навантажувати циклами нагрівання-охолодження до досягнення 200 циклів випробувань. Потім зразки розрізали перпендикулярно до наплавленої поверхні, виготовляли макрошліфи і виконували заміри глибини розповсюдження тріщин. У підсумку, термостійкість кожного типу наплавленого зразка оцінювалася по двом показникам – кількості циклів до появи сітки тріщин, і глибини їх розповсюдження по досягненню 200 циклів нагрів-охолодження. Визначення обох показників розраховувалось як середнє значення по трьом зразкам одного типу.

Проведення металографічних досліджень зразків наплавленого металу виконували за стандартними методами. Зразки були підготовлені на високошвидкісних полірувальних колах, з вико-

ристанням алмазних паст різної дисперсності. Виявлення структури наплавленого металу проводили шляхом електролітичного травлення в 20%-му водяному розчині хромової кислоти. Дослідження мікроструктури здійснювали на металографічному оптичному мікроскопі «Neophot-32» при збільшенні $\times 200$. Твердість фазових складових вимірювали на мікротвердомірі М-400 фірми «Лесо», навантаження становило 1Н, час навантаження – 10 с. Цифрові зображення мікроструктур отримували за допомогою фотокамери «Olympus C-500». Визначення глибини термічних тріщин виконували по виготовленим макрошліфам на металографічному мікроскопі МІМ-7, обладнаному цифровим відеоокуляром SIGETA MCMOS 3100 при збільшенні $\times 90$.

Виготовлення зразків, проведення експериментальних досліджень та обговорення їх результатів. Для визначення впливу мікролегування бором на зварювально-технологічні властивості порошкових дротів та якість формування наплавленого металу виконували електродугове наплавлення дослідними порошковими дротами ПП-Нп-25Х5ФМС на пластини зі сталі 40Х. Наплавлення всіх зразків виконували під флюсом АН-26П на однаковому режимі: струм – $220...230$ А, напруга $36...37$ В, швидкість наплавлення 25 м/год. Наплавлення виконували одиночними валиками з перекриттям приблизно 50 %. З метою уникнення впливу перемішування основного металу, наплавлення кожного зразка виконували в чотири шари.

Зовнішній вигляд зразків після наплавлення наведено на рис. 3, а, з якого видно, що якість

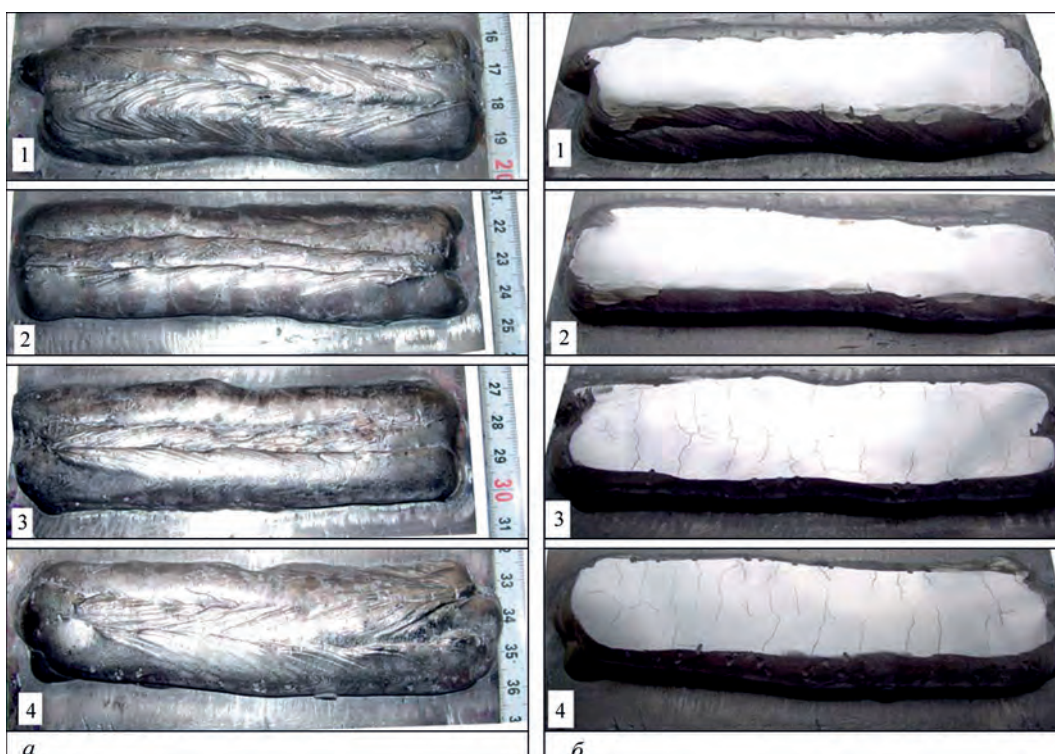


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків зі сталі 40Х після наплавлення (а) і механічної обробки (б). Вміст бору в наплавленому металі, %: 1 – 0; 2 – 0,007; 3 – 0,02; 4 – 0,04

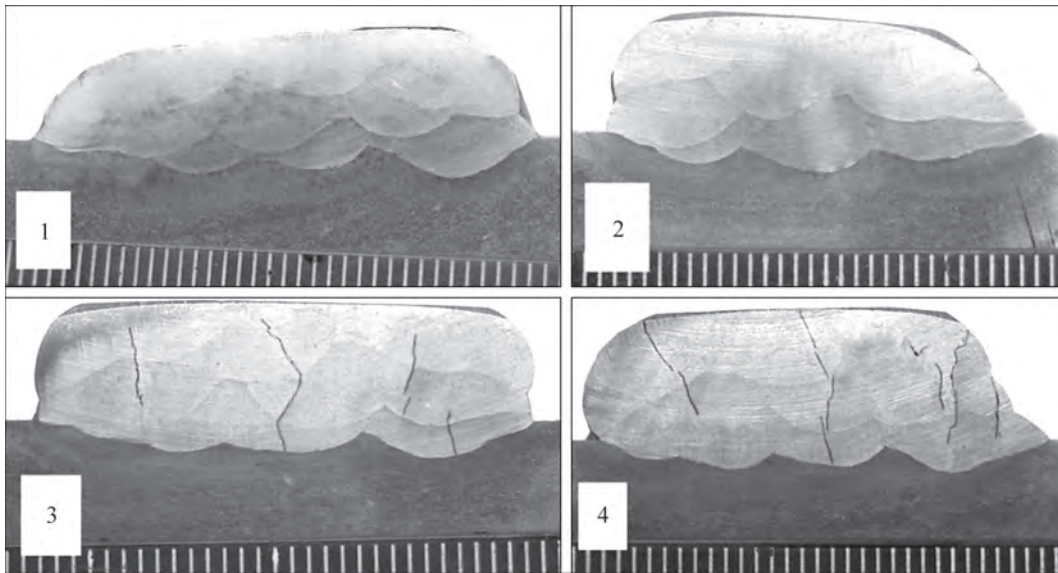


Рис. 4. Поперечні макрошліфи наплавленого металу з різним вмістом бору, %: 1 – 0; 2 – 0,007; 3 – 0,02; 4 – 0,04

формування металу, наплавленого всіма дослідними дротами, практично однакова. Якість відділення шлакової кірки у всіх випадках також знаходилася на одному рівні і була задовільною. Після наплавлення поверхню зразків було прошліфовано та досліджено на наявність пор, тріщин та інших дефектів (рис. 3, б). З наплавлених зразків також були вирізані темплети та підготовлені поперечні макрошліфи (рис. 4).

З наведених рисунків видно, що в усіх наплавлених зразках лінія сплавлення чітка, дефекти у вигляді несплавлень, пор та ін. – відсутні. Однак підвищення вмісту бору $\geq 0,02$ % призводить до появи в наплавленому металі кристалізаційних тріщин, які здебільшого проходять через всі наплавлені шари і доходять до основного металу, проте не переходять в нього.

В табл. 1 наведені дані рентгеноспектрального аналізу вмісту бору в наплавленому металі, а також вплив мікролегування бором на його твердість (зразки № 1–4). Експериментально визначено, що при електродуговому напавленні під флюсом порошковими дротами, що містять лігатуру ФХБ-1, у напавлений метал переходить до 70 % бору, що призводить до поступового підвищення твердості наплавленого металу типу сталі 25Х5ФМС. Додатки лігатури ФХБ-1 не погіршують його зварювально-технологічні характеристики і не впливають на якість формування наплавленого металу та відділення шлакової кірки. Разом з тим, як зазначено вище, при вмісті бору в наплавленому металі $\geq 0,02$ % відмічена поява великої кількості тріщин.

Металографічні дослідження металу типу сталі 25Х5ФМС, наплавленого дослідними порошковими дротами, показали, що структура наплавленого металу в його центральній частині у зразках усіх типів – лита, складається зі стовпчастих кристалітів, орієнтованих у напрямку тепловідведення (рис. 5). Ширина кристалітів у досліджених зразках трохи відрізняється і становить: зразок № 1 – 40...45 мкм; зразок № 2 – 20...22 мкм; зразок № 3 – 18...20 мкм; зразок № 4 – 15...20 мкм. Таким чином, введення в напавлений метал мікродобавок бору в кількості до 0,04 % призводить до подрібнення мікроструктури металу та зменшення середнього розміру зерен в 2,2...2,5 рази.

Мікроструктура матриці – дрібногочастий мартенсит (рис. 5). У зразках, мікролегованих бором, у нижній частині наплавленого металу, ближче до лінії сплавлення, спостерігаються окремі ділянки з більшими голками (довжина голок до 50 мкм) (рис. 6, б–г), твердість цих ділянок не відрізняється від твердості інших зон наплавленого металу.

У границь кристалітів у структурі всіх досліджених зразків спостерігаються гладкі світлі виділення, які імовірно являють собою легований аустеніт. Твердість цих виділень складає $HV1 - 6340...6420$ МПа. У зразка № 2 найменша кількість таких виділень, а у зразка № 4 – найбільша.

Структура ЗТВ у зразка № 2 (0,007 % В) на ділянці перегріву являє собою ферит й перліт (рис. 7, а). У ЗТВ спостерігаються відрізки, де ділянка перегріву відсутня, і з боку основного металу спостерігається дисперсна ділянка перекристалізації із дрібнозернистою феритно-перлітною

Таблиця 1. Твердість металу, наплавленого дослідними порошковими дротами типу ПП-Нп-25Х5ФМС з різним вмістом бору

Номер зразка	Масова частка бору в наплавленому металі, %	Твердість наплавленого металу
1	–	50...54
2	0,007	54...55
3	0,02	54...56
4	0,04	55...57

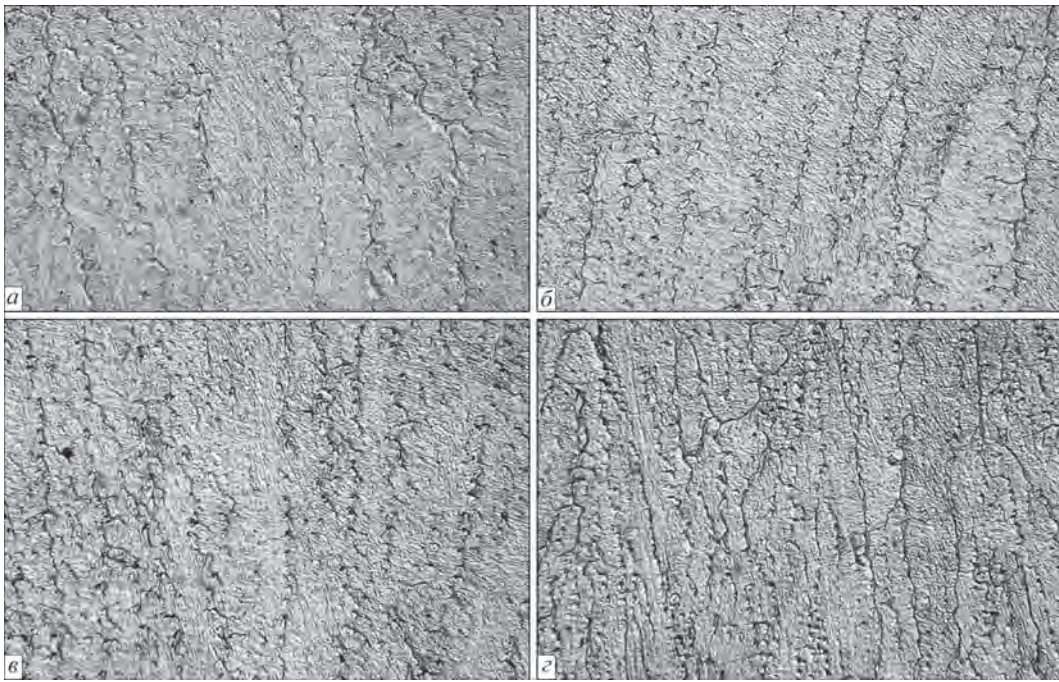


Рис. 5. Мікроструктура ($\times 200$) центральної частини напавленого металу з різним вмістом бору: *a* – без бору; *б* – 0,007 %; *в* – 0,02; *г* – 0,04

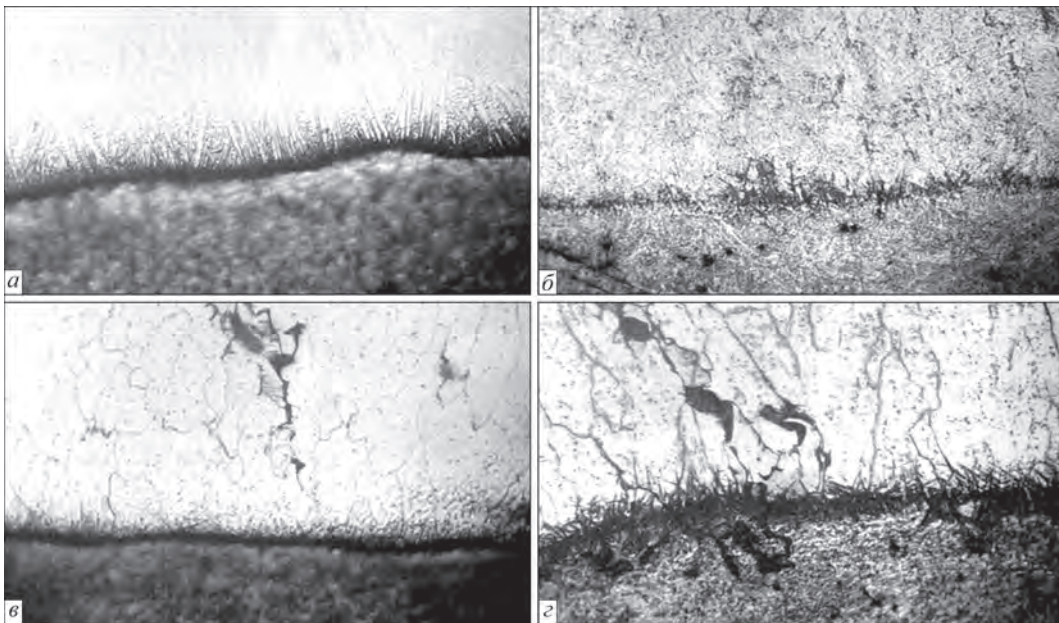


Рис. 6. Мікроструктура ($\times 200$) металу поблизу лінії сплавлення напавленого (вгорі) та основного (внизу) металу, при різному вмісті бору: *a* – без бору; *б* – 0,007 %; *в* – 0,02; *г* – 0,04

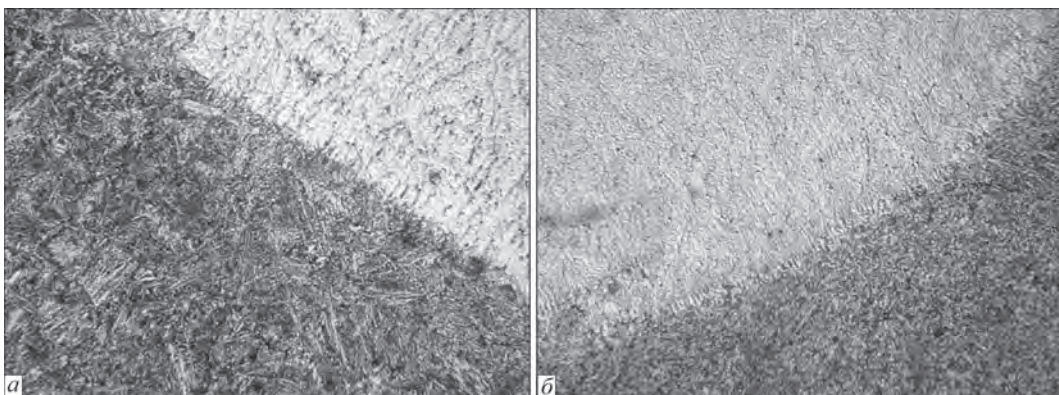


Рис. 7. Мікроструктура ($\times 200$) напавленого металу з вмістом $B = 0,007\%$ поблизу лінії сплавлення та ЗТВ (опис *a*, *б* див. у тексті)

структурою (рис. 7, б), твердість металу якої складає $HV1 - 2380...2450$ МПа. Така структура утворюється при повторному нагріванні в процесі послідовного наплавлення валиків.

Дефектів на лінії сплавлення та у ЗТВ у зразках № 1 (без В) та № 2 (0,007 % В) не виявлено. В зразках № 3, 4 біля лінії сплавлення відзначено велику кількість мікротріщин (рис. 6, в, з), які здебільшого проходять по границям зерен і розповсюджуються далі в наплавлений метал. Зі збільшенням вмісту бору кількість тріщин і їх розміри зростають (рис. 8). Також слід зазначити наявність виділень округлої форми в тілі кристалітів, які, можливо, є складними карбоборидами. Кількість цих виділень також збільшується зі збільшенням вмісту мікродобавок бору у наплавленому металі (рис. 9).

Підвищення вмісту бору в наплавленому металі від 0,02 до 0,04 % приводить до деякого підвищення мікротвердості його матриці по всьому об'єму наплавленого металу (табл. 2).

Таким чином, мікролегування бором наплавленого металу типу сталі 25Х5ФМС у кількості

0,007...0,04 % приводить до значного подрібнення мікроструктури наплавленого металу та збільшення мікротвердості його матриці. Разом з тим, при вмісті бору в наплавленому металі $\geq 0,02$ %, в ньому починають з'являтися мікротріщини, що розповсюджуються від лінії сплавлення з основним металом та проходять крізь всі шари наплавленого металу. Зі збільшенням вмісту бору до 0,04 % кількість та розгалуженість цих тріщин значно зростає.

Враховуючи викладене вище, при дослідженні впливу мікролегування бором на експлуатаційні властивості наплавленого металу вирішено обмежити максимальний вміст бору у наплавленому металі на рівні 0,01 % для уникнення появи тріщин і зниження службових властивостей наплавленого металу.

Наплавлення зразків для визначення стійкості проти термічної втоми виконували одиничними валиками з перекриттям 40...50 % на заготовки розмірами 20×40×200 мм. Для виготовлення зразків для дослідження стійкості наплавленого металу в умовах тертя метал по металу при під-

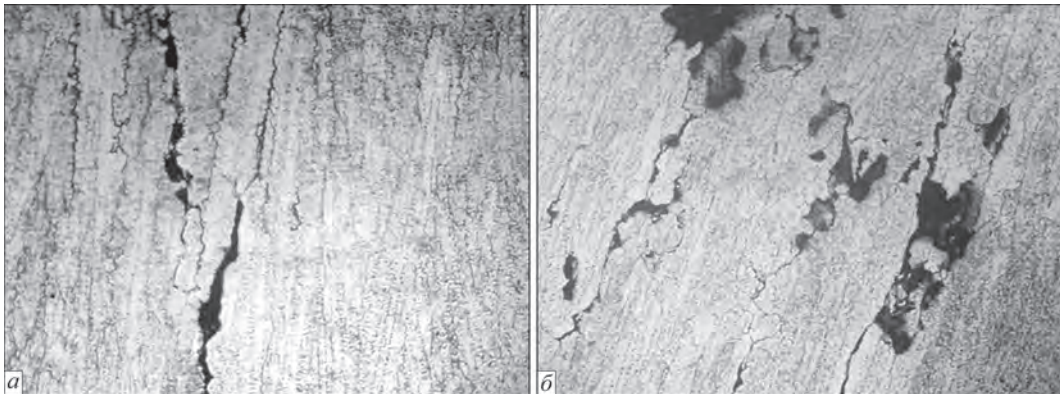


Рис. 8. Мікроструктура (×200) ділянок центральної частини наплавленого металу з вмістом бору: а – 0,02 %; б – 0,04

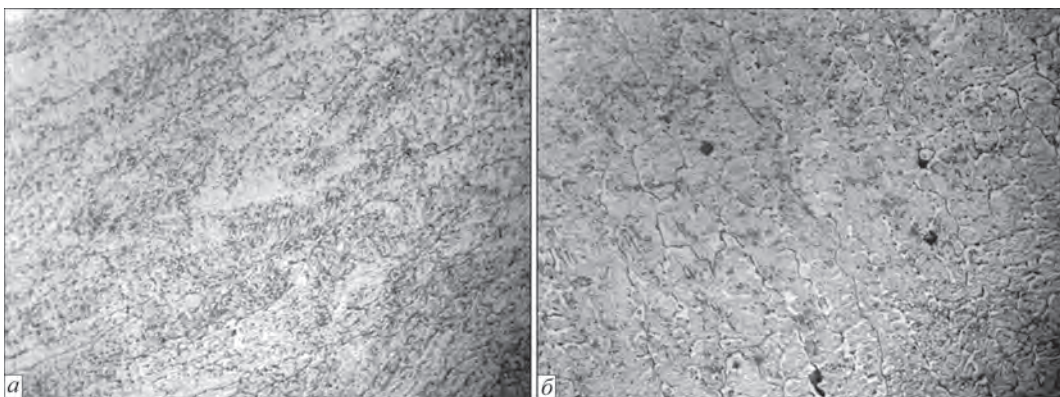


Рис. 9. Мікроструктура (×200) верхньої частини наплавленого металу у зразках з вмістом бору: а – 0,02 %; б – 0,04

Таблиця 2. Мікротвердість ділянок металу, наплавленого дослідними порошковими дротами з різним вмістом бору

Ділянка наплавленого металу	Мікротвердість (HV1) при вмісті бору:			
	– (зразок № 1)	0,007 % (зразок № 2)	0,02 % (зразок № 3)	0,04 % (зразок № 4)
Верх	5720...6420	6130...6420	6420...7240	6490...7240
Центр	5420...6420	5720...6490	5920...6630	6060...6420
Низ	5660...5720	5480...5720	6060...6420	6130...7070

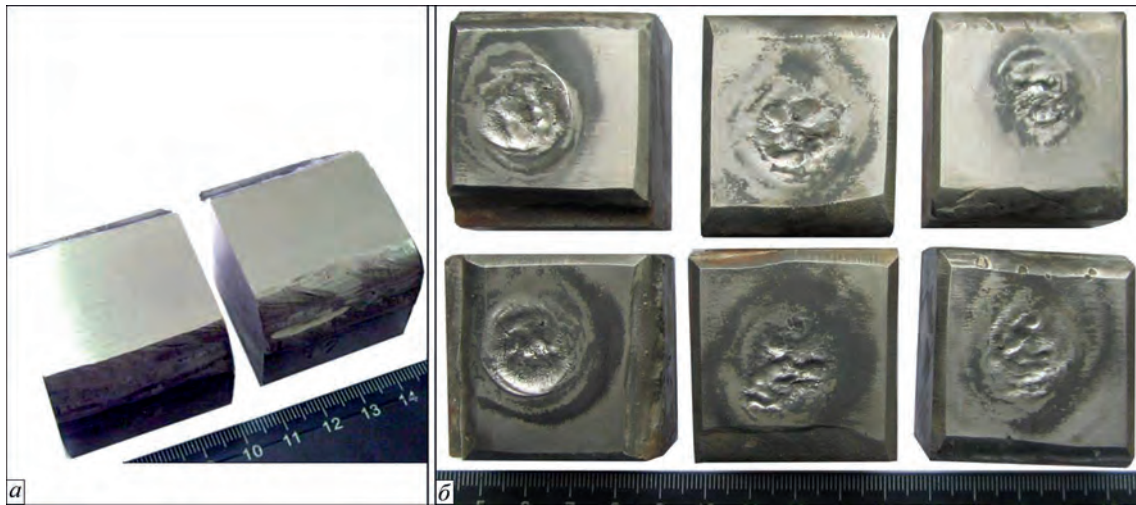


Рис. 10. Зовнішній вигляд зразків для дослідження термостійкості наплавленого металу до (а) та після випробувань (б)

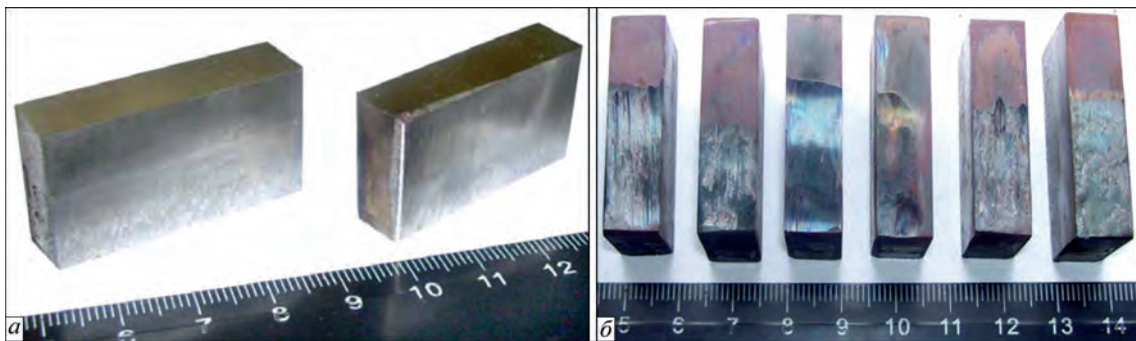


Рис. 11. Зовнішній вигляд зразків для дослідження зносостійкості наплавленого металу при підвищеній температурі до (а) та після випробувань (б)

Таблиця 3. Результати дослідження термостійкості наплавленого металу (середні значення)

Номер зразка	Кількість циклів до появи:				Глибина тріщин, мм	
	Першої тріщини	Нових тріщин	Дрібної сітки тріщин	Розвиненої сітки тріщин	Середня	Максимальна
1	70	100	140	175	0,07	0,13
2	100	130	170	200	0,04	0,07

вищеної температурі виконували наплавлення одиничними валиками без перекриття на торець заготовок розмірами 15×25×200 мм. Така техніка наплавлення була обрана виходячи з розмірів та конструкції зразків для визначення службових характеристик наплавленого металу, відповідно до розроблених методик експериментальних досліджень.

Зразки для дослідження термічної стійкості наплавленого металу мали розміри 40×40×30 мм, при цьому поверхня, що нагрівається, мала розміри 40×40 мм. Зразки для дослідження зносостійкості при підвищених температурах мали розміри 10×17×40 мм, при цьому поверхня, що зношується, мала розміри 10×17 мм. Зовнішній вигляд зразків до та після досліджень термостійкості та

Таблиця 4. Результати дослідження зносостійкості при підвищених температурах (середні значення)

Номер зразка	Втрата маси, г	
	Наплавленого зразка	Кільця (контртіла)
1	0,456	5,4
2	0,373	2,8

зносостійкості наведений на рис. 10 та 11, а результати цих досліджень наведені в табл. 3 та 4 відповідно.

Мікролегування наплавленого металу 25X5МФС бором у межах 0,007...0,01 % позитивно впливає на термостійкість наплавленого металу типу 25X5ФМС. Тріщини термічної втоми у мікролегованому бором металі наплавленого зразка зароджуються пізніше, їхня середня довжина та кількість менша, аніж у зразка-еталона. Також відзначений позитивний вплив мікролегування бором і на зносостійкість металу при терті металу по металу при підвищених температурах – втрати маси зразка і кільця (контртіла), яке зношує зразок, знижуються у 1,2 та 2,0 рази відповідно.

Висновки

1. Мікролегування наплавленого металу типу 25X5ФМС бором в межах 0,007...0,01 % призводить до значного подрібнення його мікроструктури та деякого підвищення мікротвердості його матриці. При цьому підвищення вмісту бору в на-

плавленому металі $\geq 0,02$ % призводить до утворення в ньому великої кількості кристалізаційних тріщин, які розповсюджуються через всі шари наплавленого металу.

2. Мікролегування наплавленого металу 25X5MFC бором у кількості 0,007...0,01 % підвищує його термостійкість та зносостійкість при підвищених температурах у 1,4...1,75 та 1,2...2,0 рази відповідно, що може бути пояснено, в основному, подрібненням його мікроструктури та підвищенням мікротвердості його матриці.

Список літератури/References

1. Рябцев И.А., Сенченков И.К., Турык Э.В. (2015) *Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
2. Kondratiev, I.A., Ryabtsev, I.A. (2014) Flux-cored wires for surfacing of steel hot mill rolls. *The Paton Welding J.*, **6-7**, 95–96. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.20>
3. Zhudra, A.P., Voronchuk, A.P. (2012) Cladding flux-cored strips (Review). *The Paton Welding Journal*, **1**, 34–38.
4. Bely, A.I., Zhudra, A.P., Dzykovich, V.I., Petrov, V.V. (2018) Electrodes for arc hardfacing of composite alloys. *Ibid.*, **1**, 29–32. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.01.06>
5. Student, M.M., Voytovych, A.A., Sirak, Ya.Ya., Gvozdetzkyi, V.M. (2020) Development of new electrode materials, methods of restoration and protection of thin-walled parts of equipment, which are operated under the conditions of abrasive and gas-abrasive wear. *Ibid.*, **10**, 31–34. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.10.06>
6. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O. (2021) Classification of methods of modification and microalloying of deposited metal (Review). *Ibid.*, **9**, 2–8. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.09.01>
7. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O. (2021) Influence of modification and microalloying on deposited metal structure and properties (Review). *Ibid.*, **10**, 3–10. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.10.01>
8. Гладкий П.В., Микаелян Г.С. (2015) *Микролегувание и модифицирование износостойкого наплавленного металла*. Сб. Наплавка. Технологии, материалы, оборудование. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 71–73.
9. Gladky, P.V., Mikaelyan, G.S. (2015) *Microalloying and modification of wear-resistant deposited metal*. In: *Surfacing. Technologies, materials, equipment*. Kyiv, PWI, 71-73 [in Russian].
9. Stepnov, K.K., Matvienko, V.N., Oldakovsky, A.I. (2011) Modification of medium-chromium deposited metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 10–12.
10. Krivchikov, S.Yu. (2012) Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *Ibid.*, **6**, 19–21.
11. Hou, Q.Y., Huang, Z., Wang, J.T. (2011) Influence of nano- Al_2O_3 particles on the microstructure and wear resistance of the nickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc overlay welding. *Surf. Coat. Technol.*, **206/8-9**, 2806–2812. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.10.047>
12. Рябцев И.И., Черняк Я.П., Осин В.В. (2004) Блочно-модульная установка для испытаний наплавленного металла. *Сварщик*, **1**, 18–20.
- Ryabtsev, I.I., Chernyak, Ya.P., Osin, V.V. (2004) Modular unit for testing of deposited metal. *Svarshchik*, **1**, 18–20 [in Russian].

INFLUENCE OF MICROALLOYING WITH BORON ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEPOSITED METAL OF THE TYPE OF TOOL STEEL 25Kh5FMS

A.A. Babinets, I.O. Ryabtsev, I.P. Lentugov, I.L. Bogaichuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

In the work, the influence of different amounts of boron microadditives on the structure and operational properties of metal of the type of tool steel 25Kh5FMS, produced by arc welding using the experimental flux-cored wires, was experimentally determined. Microalloying additives were introduced directly into the charge of experimental flux-cored wires during their manufacture. It was found that microalloying of the deposited metal of the type of steel 25Kh5FMS with boron in the amount of 0.007...0.04 % does not deteriorate the quality of deposited beads formation and separation of the slag crust. At the same time, when the boron content in the deposited metal is $\geq 0.02\%$, the formation of a large number of crystallization cracks is observed, which has an extremely negative effect on its operational properties. Moreover, it was experimentally found that the introduction of boron microadditives in the amount of 0.007...0.01% to the deposited metal of the type 25Kh5FMS leads to an increase in its heat resistance and wear resistance at elevated temperatures by 1.2...2.0 times. With an optimal content of microalloying additives, a refinement of the structure of the deposited metal, some increase in microhardness and, probably, the formation of complex spherical carboborides in the alloy matrix occur. In view of the obtained data, it is recommended to use boron in the deposited metal of the type of tool steel 25Kh5FMS in the amount of 0.007...0.01% in order to improve its operational properties. 12 Ref., 4 Tabl., 11 Fig.

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

Надійшла до редакції 26.05.2022

НОВА КНИГА



Втомна довговічність наплавлених деталей: монографія / **Рябцев І.О., Книш В.В., Бабінець А.А., Соловей С.О.** (Під загальною редакцією д.т.н., проф. І.О. Рябцева). К.: Інтерсервіс, 2022. – 204 с.

Книга є узагальненням накопиченого авторами досвіду та наявних у технічній літературі відомостей з однієї з важливих проблем наплавлення – втомної довговічності наплавлених деталей, що експлуатуються в умовах різних видів зношування та циклічних механічних і термічних навантажень. Основну увагу в монографії приділено експериментальним дослідженням за розробленими авторами методиками втомної довговічності багатозарових зразків, наплавлених різними за хімічним складом та механічними властивостями матеріалами, залежно від їх опирання (закріплення) та зношування, а також області застосування та особливостей формування циклічних механічних навантажень. Придільено також увагу проблемі ремонту за допомогою наплавлення деталей із втомними пошкодженнями, коли довжина втомної тріщини ще не досягла критичного

розміру, після якого слідує аварійне руйнування деталі.

Розрахована на інженерно-технічних працівників, зайнятих у галузі наплавного та зварювального виробництва. Може бути корисною викладачам, аспірантам та студентам технічних університетів.

ISBN 978-966-999-255-0