

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ТА МІКРОЛЕГУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ (Огляд)

А.А. Бабінець, І.О. Рябцев

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

На основі літературних даних показано вплив модифікування та мікролегування бором, титаном, вольфрамом, цирконієм, ітрієм та ін. на структуру, механічні та експлуатаційні властивості наплавленого металу. Показано, що введення цих елементів або їх сполук з вуглецем та азотом в кількостях до 0,2 % приводить до отримання дрібнозернистої, однорідної структури металу, одержанню більш рівномірного розподілу легуючих елементів, що позитивно позначається на показниках міцності, пластичності, зносо- та термостійкості. Визначено, що з точки зору підвищення зносостійкості та термостійкості наплавленого металу, перспективно виглядає введення малих добавок бору або його з'єднань (у кількості до 0,2 %), церію або ітрію (у кількостях до 0,015 % кожного) або ж використання комплексних лігатур, до складу яких можуть входити вищепераховані елементи, а також такі модифікатори як цирконій, карбіди та бориди титану чи карбіди вольфраму. Також на основі проведеного аналізу показано, що введення у склад шихти порошкових дротів дйборидів титану та цирконію сприяє активуванню процесів формування розплавлених крапель металу на торці електродного дроту, в результаті чого відбувається підвищення якості переносу металу у зварювальній дузі, що збільшує значення коефіцієнтів переходу легуючих елементів у наплавлений метал та покращує формування наплавлених валиків. Бібліогр. 28, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: дугове наплавлення, наплавлений метал, інструментальна сталь, модифікування, мікролегування, структура металу, зносостійкість, термостійкість

Широко відомо, що механічні та експлуатаційні властивості сталей та сплавів визначає їх хімічний склад та структура. Таким чином, впливаючи на структуру металу можна в певних межах змінювати його властивості. У роботі [1] було проаналізовано основні способи модифікування та мікролегування наплавленого металу та показано, що з розглянутих способів найбільш простим і раціональним є введення малих добавок (до 0,2 %) хімічних елементів або їх з'єднань безпосередньо через шихту порошкових електродних дротів.

Метою даної роботи є аналіз літературних даних щодо впливу малих добавок (до 0,2 %) хімічних елементів або їх з'єднань на структуру наплавленого металу, його експлуатаційні властивості, а також на показники стабільності процесу електродугового наплавлення.

Слід відмітити, що у більшості робіт, проаналізованих в даній статті, досліджувався вплив окремих хімічних елементів або їх з'єднань в якості саме модифікуючих часток, тобто таких, дія яких полягає у регулюванні первинної кристалізації та/або зміни ступеня дисперсності фаз, які кристалізуються. Щодо мікролегування, то цей термін здебільшого застосовується для такого елемента як бор та його з'єднань з іншими елементами, роль яких проявляється переважно внаслідок впливу на твердий стан металу (утворення твердого розчину впровадження або заміщення та ін.) [1].

Вплив елементів-модифікаторів і їх з'єднань на структуру наплавленого металу, його механічні та експлуатаційні властивості. В загальному випадку можна відзначити, що застосування модифікаторів приводить до подрібнювання зерна наплавленого металу й одержанню більш рівномірної структури, що позитивно позначається на його пластичних характеристиках, впливає на технологічні та інші властивості металу [2–6 та ін.].

Оскільки розмір зерна залежить від співвідношення швидкостей зародження й росту кристалів, то й модифікування по суті спрямоване на зміну цих параметрів у потрібному напрямку. Як правило, при модифікуванні в рідкому металі з'являється велика кількість центрів кристалізації. Подальший їх ріст залежить від характеру впливу модифікуючих добавок або фізичних впливів на обстановку в приграничній зоні кристал – розплав [1]. У більшості випадків розчинні або нерозчинні добавки виявляють гальмуючу дію на ріст кристалів, при цьому конкретний механізм гальмування росту залежить від природи модифікуючої добавки й механізму її дії. Було встановлено два типи впливу вмісту модифікаторів на структуру металів [2]: монотонне подрібнювання зерна при поступовому підвищенні вмісту модифікатора та немонотонне подрібнювання зерна з областю оптимальної концентрації модифікатора в межах 0,01...0,10 %, перевищення якої знову приводить до збільшення розміру зерна.

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

© А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, 2021

Варіант монотонного зменшення розміру зерна з підвищенням концентрації модифікатора характерний для нерозчинних добавок-каталізаторів (наприклад, титан в алюмінії), а варіант немонотонного подрібнювання зерна – для поверхнево-активних розчинних домішок (наприклад, магній у цинку) [2]. Вплив модифікаторів на окремі структурні складові сталі (сплаву) схематично зображено на рис. 1 і в таблиці.

Розглянемо вплив модифікування та мікролегування на структуру та властивості сталей і сплавів більш детально, згрупувавши наявні в технічній літературі дані по найменуванню відповідних хімічних елементів.

Бор. Широко відомо, що мікродобавки бору використовують для поліпшення комплексу механічних властивостей конструкційних сталей,

які зазнають загартування з відпуском. При цьому вплив бору пов'язують із підвищенням прогартуваності та подрібнення зерна аустеніту [3–6].

Крім подрібнювання розмірів зерен, мікролегування бором впливає на твердість наплавленого металу й мікротвердість зерен твердого розчину, у той час як мікротвердість карбідної фази залишається практично без зміни. Збільшення твердості наплавленого металу при незначному зниженні твердості продуктів розпаду аустеніту, на думку авторів [7], пов'язане з підвищенням щільності й розгалуженості зміцнених бором міжзеренних границь.

У роботі [5] встановлено, що застосування порошкового дроту з мікродобавками нітриду бору перспективно для відновлення наплавленням роликів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). У результаті на поверхні роликів МБЛЗ

формується зносостійкий шар наплавленого металу типу 30X5M2B2ГФ із твердістю до HRC 57, високою термостійкістю та низьким коефіцієнтом тертя в порівнянні із шаром, наплавленим немодифікованим матеріалом.

Разом з тим, дані про вплив мікродобавок бору на пластичні властивості сталей досить неоднозначні. У роботі [8] показано, що при вмісті бору в металі на рівні 0,0015...0,0025 % можна ефективно управляти пластичними властивостями низьколегованих сталей класу міцності K40. Мікролегування низьколегованих сталей типу 08Г2С, 10Г2С і т.п., бором (0,002...0,004 %) сприяє підвищенню їх металургійної чистоти, в резуль-

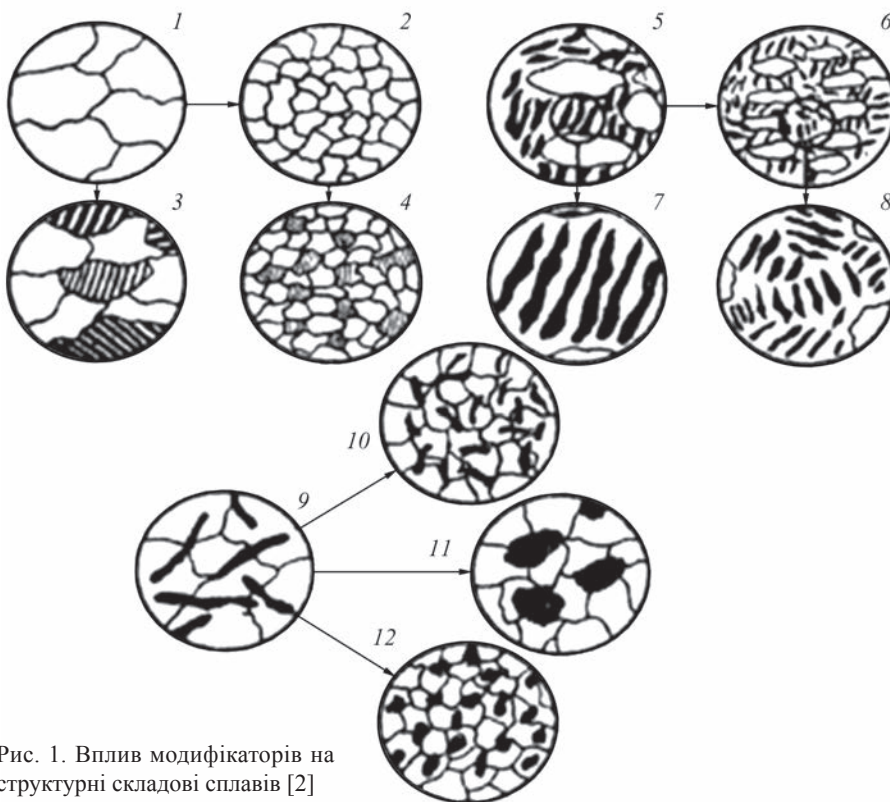


Рис. 1. Вплив модифікаторів на структурні складові сплавів [2]

Результати впливу модифікаторів на структуру сталей та сплавів [2]

Тип сплаву	Результат	Структури (див. рис. 1)
Сплави – тверді розчини (вуглецеві сталі з феритно-перлітною структурою)	Подрібнювання первинного зерна	1, 2
->-	Фазова перекристалізація	1, 3
->-	Подрібнювання вторинного зерна після фазової перекристалізації	1, 2, 4
Сплави з первинними виділеннями й евтектикою (сірий і високоміцний чавун)	Подрібнювання обох структурних складових	5, 6
->-	Крупнокристалічна евтектика	7
->-	Тонкопластинчата евтектика з дуже короткими пластинами	8
->-	Подрібнювання окремих великих структурних складових	9, 10
->-	Коагуляція й сфероїдизація структурних складових	11, 12

тагі чого підвищується рівень ударної в'язкості сталі [9], однак знижується її пластичність [10]. Про зниження пластичності та ударної в'язкості конструкційної сталі 35 зазначено в роботі [11] при мікролегуванні бором у таких же кількостях (до 0,005 %).

Такий неоднозначний вплив бору на властивості сталей пов'язаний з тим, що він є більш активним розкислювачем у порівнянні із кремнієм і марганцем, і має високу поверхневу активність. Через це бор переважно розташовується по границях зерен, що приводить до перерозподілу домішок і на границях зерен, різко зменшується концентрація сірки, марганцю, азоту й титану. Крім того, бор може утворювати твердий розчин впровадження в комбінації зі здатністю витіснити домішки із границь в об'єм зерна [10].

Титан. Титан у вигляді його з'єднань з вуглецем, азотом та бором досить широко застосовуються при модифікуванні сталей в першу чергу через високу температуру плавлення цих з'єднань (> 3000 K). Найчастіше в якості модифікатора використовують карбонітриди титану. За даними робіт [12, 13], мікролегування високолегованих сталей типу 10X15H4AM3 карбонітридом титану приводить до різкого подрібнювання макрозерна, усунення стовпчатості зерен і різнозернистості. Карбіди отримують компакту рівновісну форму та рівномірно розподіляються за об'ємом зерна: у немодифікованому сплаві карбіди протяжної форми і досягають розмірів 50 мкм, у модифікованому сплаві карбіди отримують компакту форму розмірами 4...8 мкм. Така зміна мікроструктури позитивно впливає на тривалу міцність, зносо- та термостійкість зразків, підвищуючи їх до 2...3 разів.

Можна припустити, що частки карбонітриду титану, які мають високу термодинамічну стабільність, піддаючись незначному розчиненню в металевому розплаві, переходять із шихти порошкового дроту у зварювальну ванну, впливаючи на кінетику

кристалізації наплавленого металу [12]. За даними роботи [13], частки карбонітриду відіграють роль ефективних інокуляторів, сприяючи подрібнюванню первинного зерна матриці сплаву. Збільшення кількості модифікатора в дроті понад 0,4 мас. % не приводить до подальшого подрібнювання зерен.

Менш однозначний вплив модифікування сталей нітридом титану. Згідно даних роботи [14], середня ширина первинних кристалів низьколегованої конструкційної сталі зменшується, але розкид значень ширини збільшується. Також наявна інформация, що введення часток нітриду титану призводить до утворення пор у металі зварного шва. Протилежні результати наведені в роботі [4], в якій показано, що введення до 0,4 мас. % часток нітриду титану в складі присадного порошкового дроту у високовуглецеву хромисту сталь типу 320X12M2HP не веде до утворення пор й сприяє росту твердості наплавленого металу з *HRC* 55 до *HRC* 57, при цьому підвищуючи стійкість високолегованого хромомолібденового наплавленого металу до абразивного зношування на 20 %. Така неоднозначність впливу нітриду титану можливо пояснюється різним класом матеріалів, що використовувалися у наведених вище дослідженнях.

У роботі [6] було показано, що модифікування конструкційної сталі 45 диборидами титану приводить до зниження дендритної неоднорідності, розбивці стовпчастих дендритів, подрібненню структури, усуненню грубих первинних виділень карбідної фази (рис. 2). При цьому структурні зміни, що відбулися, не вплинули на твердість металу, однак підвищили його зносостійкість [6]. За даними робіт [12, 15], введення диоксиду титану в присадний матеріал при зварюванні підвищує межу плинності і міцності зварних швів в середньо- та високолегованих сталях.

Вольфрам. Відзначено подрібнювання структури низьковуглецевого низьколегованого [14, 16], а також, середньо- та високолегованого металу типу

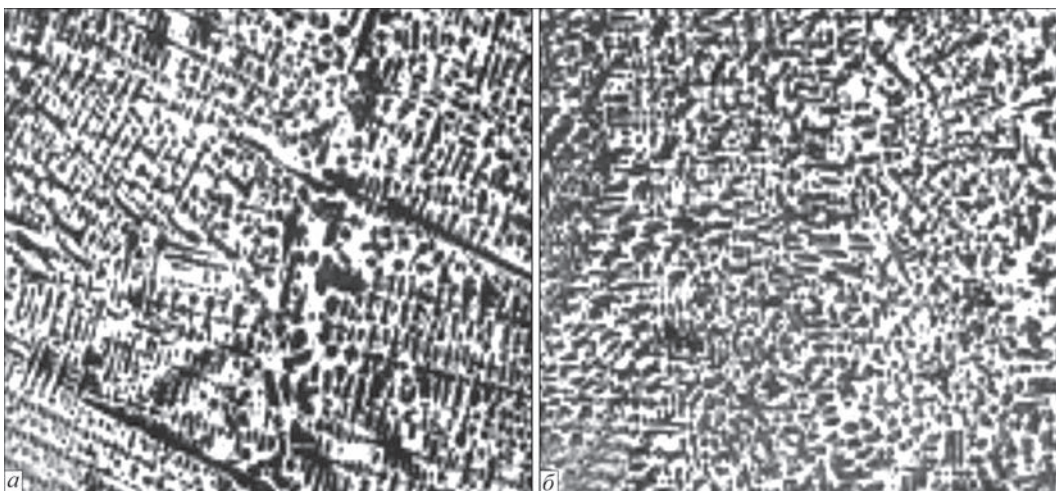


Рис. 2. Вплив модифікатора TiB_2 на структуру наплавленого шару ($\times 100$) [6]: а – без модифікатора; б – з модифікатором

хромистих сталей [16] при модифікуванні їх порошками карбіду вольфраму при їх вмісті в металі до 0,04 %. Відзначено, що в модифікованому металі типу низьколегованої сталі структура стає більш однорідною, виявляючи позитивний вплив на пластичні характеристики [14].

Схожий вплив добавок карбіду вольфраму відзначений у роботі [16], де показано, що структура наплавленого металу типу високовуглецевої хромистої сталі у вихідному стані являє собою феритно-перлітну суміш (рис. 3, а). Введення нанокарбідів вольфраму призводить до трансформації структури металу в модифікований субдисперсний твердий розчин на основі α -Fe із залишковим аустенітом, розташованим по границях зерен (рис. 3, б). Кількість неметалевих включень, які колись мали довільні обриси й були нерівномірно розподілені в металі, скоротилась на 15...20 %. Включення, що залишилися, розподілені більш рівномірно й мають глобулярну форму. Така структура металу, на думку авторів роботи, повинна сприяти підвищенню його пластичних властивостей в умовах циклічного навантаження.

Цирконій. Застосування цирконію обумовлене його здатністю перешкоджати росту зерна та активно взаємодіяти з вуглецем і азотом (активніше ніж титан), внаслідок чого утворюються дисперсні карбіди та нітриди [3, 17]. Їхній вплив на властивості з'єднань проявляється у вигляді

подрібнювання зерна, підвищення механічних властивостей, зниження порогу холодноламкості та чутливості до концентраторів напружень як сталей так і сплавів, в тому числі, з легких металів [11, 18]. Наприклад, модифікування алюмінієвих сплавів шляхом введення до складу шихти порошкового дроту фторцирконату калію (K_2ZrF_6) [18] призводить до рафінування металу зварювальної ванни та підвищення загальної кількості центрів кристалізації, внаслідок чого наплавлений метал отримує дрібнозернисту структуру з рівномірним розподілом легуючих елементів, що обумовлює підвищення його зносостійкості в 1,2 рази. За даними роботи [11] нітриди і карбіди цирконію по міцності та стійкості перевершують аналогічні з'єднання титану, ванадію та молібдену. У зв'язку з цим, суттєво підвищуються показники міцності та пластичності конструкційних сталей (рис. 4).

Церій. Церій відомий завдяки своїй здатності нейтралізувати вплив поверхнево-активної сірки в процесі кристалізації наплавленого металу та при тривалих високотемпературних нагрівах [19]. Модифікування сталей типу 30ХГСА, Х5МФ, Х12МФ церієм в кількостях до 0,009 % приводить до підвищення технологічної міцності, ударної в'язкості і опору термовтомному руйнуванню наплавленого металу [19, 20]. Ефект досягається за рахунок зв'язування сірки в тугоплавкі дрібнодисперсні з'єднання, зниження мікрохімічної не-

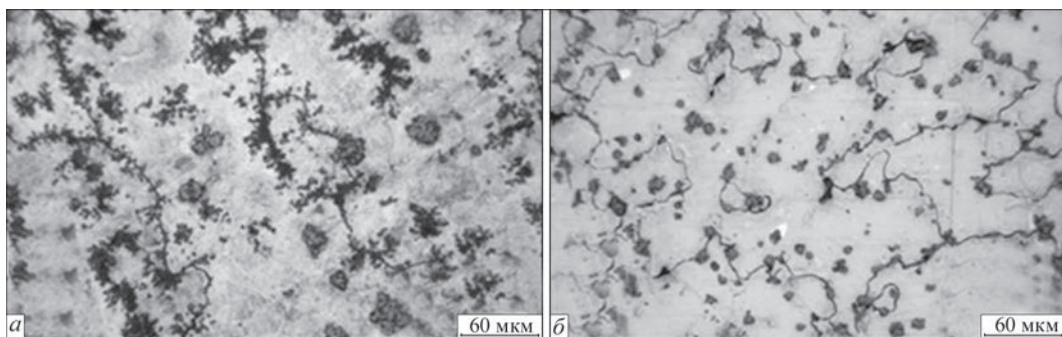


Рис. 3. Вихідна структура металу, наплавленого ЕПН порошковим дротом (а), і тим же дротом але із шихтою, що містить нанокарбіди вольфраму (б) ($\times 200$) [16]

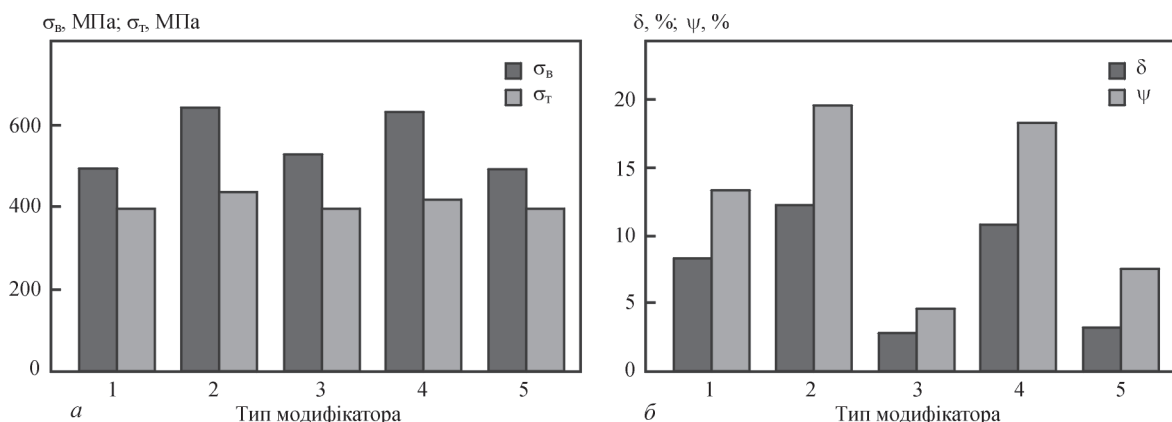


Рис. 4. Вплив різних елементів на показники міцності (а) і пластичності (б) немодифікованої (1) та модифікованої ванадієм (2), молібденом (3), цирконієм (4) та бором (5) конструкційної сталі [11]

однорідності, подрібнювання аустенітного зерна. При цьому зменшується також забруднення металу шва неметалевими включеннями [21].

Ітрій. Ітрій має винятково велику спорідненість до кисню, азоту, сірки й інших елементів, утворюючи з ними термодинамічно стійкі з'єднання. Серед рідкоземельних елементів (РЗМ) спорідненість ітрію до кисню при температурах зварювальної ванни найбільша. Згідно даних роботи [17], дослідження наплавленого металу типу 15X8H2M2Ф, модифікованого ітрієм, показали, що у порівнянні із церієм, ітрій має певні технологічні переваги: при введенні його в рідкий метал відсутній піроефект, він більш стабільно засвоюється рідкою сталлю і, крім того, для одержання оптимальних властивостей сталі його необхідно в 3-4 рази менше, ніж церію. Оптимальний вміст ітрію в наплавленому металі знаходиться в межах 0,013...0,015 % [17].

Так, при мікролегуванні наплавленого металу ітрієм відбувається підвищення механічних і експлуатаційних властивостей – зносостійкості і термостійкості на 20...30 % (рис. 5), яке пояснюється, очевидно, подрібнюванням структури металу, зміною форми, величини й характеру розподілу неметалевих включень, очищенням границь зерен від сірки й інших шкідливих домішок [17, 22].

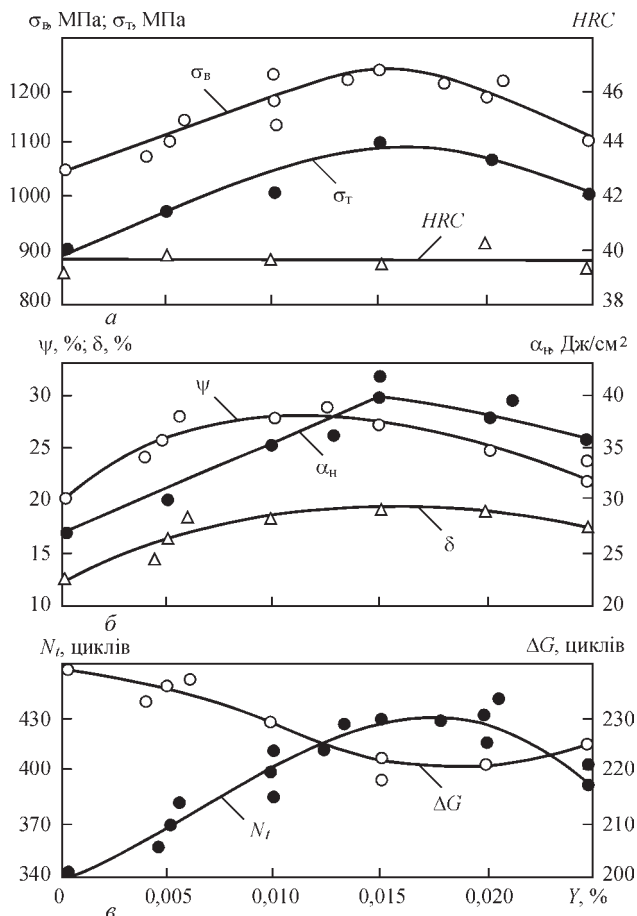


Рис. 5. Вплив ітрію на механічні властивості (а, б), зносостійкість ΔG і термостійкість N_t (в) наплавленого металу типу 15X8H2M2Ф [17]

Кальцій. У загальному випадку введення в сталь кальцію підвищує її рідкоплинність, видозмінює оксидні та сульфідні включення, поліпшує пластичні властивості та ін. Кальцій відрізняється низькою розчинністю в металі й низькими температурами плавлення й кипіння, через що він практично повністю видаляється з металу. Тому для збереження ефекту модифікування необхідно вводити до складу лігатур багато інших елементів, що сприяють подовженню дії кальцію [3].

Стронцій. Стронцій по своїх фізико-хімічних властивостях займає проміжне положення між кальцієм і барієм і також обмежено використовується для підвищення ефективності модифікування металу [3].

Барій. Барій часто використовується в комплексі з кальцієм для підвищення його засвоєння й посиленню позитивного впливу останнього, хоча в ряді випадків відзначається ефективність використання одного барію (без кальцію) [3].

Вплив комплексних модифікаторів на структуру наплавленого металу, його механічні та експлуатаційні властивості. Виходячи з того, що одні добавки-модифікатори подрібнюють структуру й блокують домішкові елементи на міжзеренних і міжфазних границях, а інші гальмують рекристалізаційні процеси й внутрішньозеренний розпад, перспективним виглядає ідея модифікування сталей комплексними добавками. У комбінації вони можуть сприяти створенню однорідного структурно-фазового стану, посиленню ефекту від впливів один одного, тощо.

Так, наприклад, мікролегування низьколегованих сталей типу 08Г2С, 10Г2С титаном і цирконієм привело до істотного поліпшення міцності та пластичності металу [23]. У роботах [19, 24] досліджували спільний вплив мікродисперсного порошку диборидів титану і цирконію, а також діоксиду церію. Показано [24], що мікролегування швів титаном і бором при багатодуговому зварюванні під нейтральними або слабокислими флюсами поліпшує структуру металу типу низьколегованої сталі 10Г2ФБ, в результаті чого в 1,5...2,5 рази збільшується ударна в'язкість сталі. Оптимальний вміст у металі шва титану й бору становить відповідно 0,022...0,038 та 0,0025...0,0065 мас. %.

У роботі [11] за рахунок введення до складу конструкційної сталі Ст. 35 мікродобавок (до 0,2 %) високоактивних елементів (V, Mo, Zr, B) вдалося досягти поліпшення структури й експлуатаційних властивостей матеріалу.

Так само за рахунок оптимальної комбінації поверхнево-активних модифікуючих добавок Ti, Al, B, Ce, Ca та V, при спільному легуванні швів (матеріал дроту – сталь 10ХГНМ, основний метал – сталь 33ХСН2МА), у роботі [25] вдалося досягти стабіль-

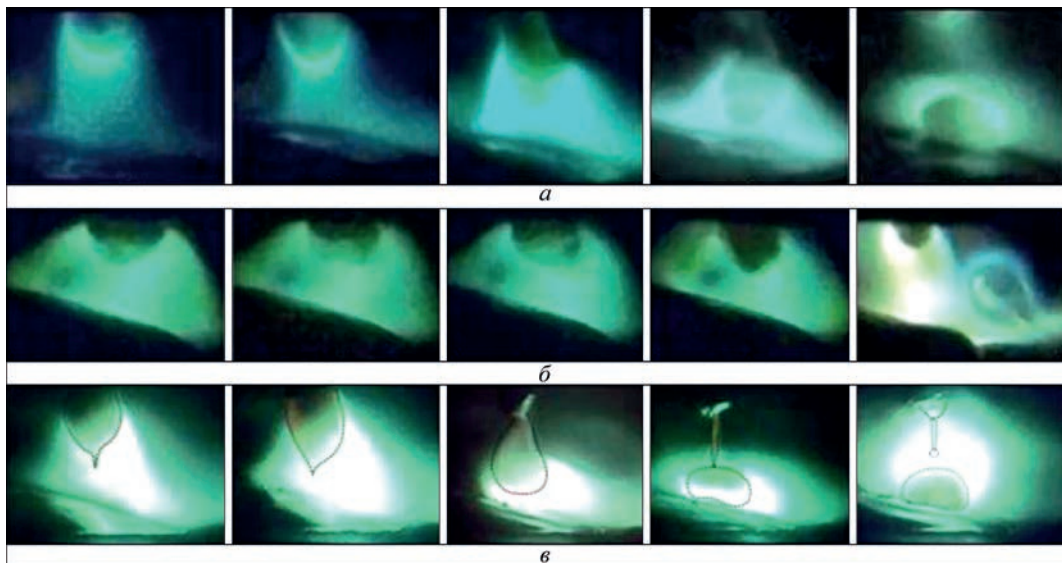


Рис. 6. Характер формування краплі електродного металу при наплавленні порошковим дротом з використанням часток TiB_2 (а), CeO_2 (б) та без них (в) [19]

ної стійкості зварних з'єднань проти тріщин при забезпеченні досить високої міцності метала шва. Завдяки досягненню певного балансу між Ti , V , Ni та Mo , у роботі [26], було досягнуто підвищення однорідності хімічного складу зварних швів і, як наслідок, підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань, виконаних з низьколегованої сталі 08Г2С.

У роботі [27] досліджували вплив введення в шихту порошкового дроту, який використовується в якості присадного при плазмовому наплавленні, комплексної лігатури, яка містить фтор, алюмокальцій, фероцерій та мідно-берилієвий сплав. Берилій вводився для зміцнення сталі й підвищення її механічних властивостей при високих температурах. Для видалення кисню, сірки й фосфору вводилися алюмокальцій і фероцерій. Наявність у дузі фтору, що має високий потенціал іонізації, веде до поліпшення саморегулювання дуги і підвищенню стабільності процесу наплавлення. Як результат, був отриманий наплавлений метал типу 2Х13Н12ГД2Ю з підвищеними механічними й експлуатаційними властивостями, зокрема – високою стійкістю до термоциклічного навантаження.

Вплив модифікування та мікролегування на зварювально-технологічні властивості матеріалів для наплавлення. Відомо, що одним із шляхів підвищення стабільності розплавлення й переносу електродного металу в дузі, є використання процесу з накладанням додаткових імпульсів струму певної частоти [19]. Однак у випадку використання порошкових дротів, керування частотою відриву краплі електродного металу вимагає забезпечення синхронності розплавлення оболонки й осердя (наповнювача), що в практиці застосування імпульсно-дугових процесів достатньо успішно застосовується лише при використанні дротів малого діаметра.

Іншим способом впливу на процес розплавлення електродного дроту є введення у його шихту модифікуючих мікродобавок різних елементів, дія яких заснована на зміні електрофізичних характеристик зварювальної дуги та, відповідно, умови теплопередачі в дуговому проміжку. Разом з тим, у технічній літературі практично відсутні дані про вплив модифікуючих добавок на такі зварювально-технологічні властивості матеріалів для наплавлення, як стабільність горіння дуги, коефіцієнт переходу легуючих елементів, якість формування наплавлених валиків та їх геометричні розміри. Є лише кілька робіт, присвячених цій тематиці.

За даними роботи [18], використання в складі шихти порошкового дроту фторцирконату калію не тільки подрібнює структуру наплавленого металу, але й підвищує стабільність дугового процесу й поліпшує формування наплавленого металу. Цей ефект досягається дією поверхнево-активних елементів, що знижують силу поверхневого натягу, які втримують краплю на торці електрода. Додатково лужний елемент калій з низьким потенціалом іонізації підвищує стабільність горіння дуги за рахунок зниження ефективного потенціалу іонізації дугового проміжку.

У роботі [19] встановлено, що введення в склад електродного матеріалу мікродобавок диборидів титану та цирконію сприяє створенню умов, при яких різномірні по теплофізичних властивостях оболонка й компоненти наповнювача порошкового дроту більш активно плавляться та формуються в металеву краплю (рис. 6). Внаслідок цього зменшується розмір крапель і підвищується частота їх відділення, що супроводжується збільшенням періодичності, з якої анодна пляма дуги переміщається між торцем тугоплавкого осердя й поверхнею металевої краплі. Результатом такого впливу є підвищення

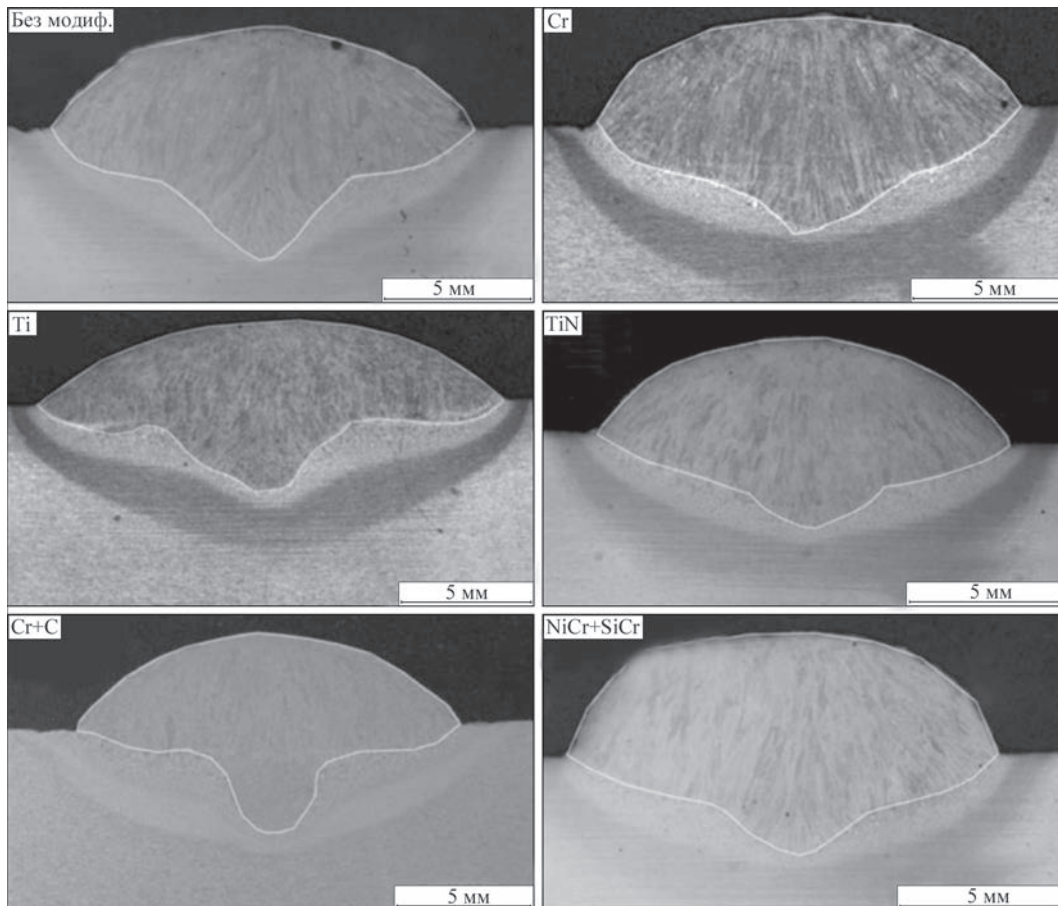


Рис. 7. Вплив типу модифікатора на форму й глибину проплавлення при зварюванні в захисних газах суцільним дротом з модифікованим покриттям [28]

якості переносу металу у зварювальній дузі, завдяки чому збільшується значення коефіцієнтів переходу легуючих елементів у наплавлений метал. Також відзначено, що при вмісті бору в наплавленому металі $> 0,05\%$ виявлено ліквідаційні ділянки з хімічною неоднорідністю і окрихчення металу.

За даними роботи [28] вплив на дугу та перенос крапель може бути здійснений через тонкі покриття, нанесені на поверхню електродних дротів, що також впливає і на геометричні розміри наплавлених валиків. Вплив деяких покриттів показано на рис. 7, з якого видно, що найменша глибина проплавлення відзначена для випадку нанесення покриття з чистого титану. В цьому випадку також було відзначено значне збільшення стійкості металу шва при циклічному навантаженні.

Висновки

1. Як видно з результатів проаналізованих досліджень, модифікування чи мікролегування сталей, при якому відбувається подрібнювання розміру їх зерна, перерозподіл неметалевих включень, очищення границь зерен та ін., загалом позитивно впливає на механічні та експлуатаційні властивості наплавленого металу, зокрема, відбувається підвищення зносо- та термостійкості.

2. Найбільш часто з метою модифікування та мікролегування сталей і сплавів застосовуються різні з'єднання титану, вольфраму, цирконію, бору. При цьому комплексне модифікування такими елементами може виявляти більш істотний вплив на властивості сталей, ніж застосування даних елементів у вигляді монодобавок.

3. З погляду забезпечення високої стабільності горіння дуги, зниження розбризкування та поліпшення якості формування наплавленого металу перспективно виглядає використання в якості модифікаторів цирконію та титану, в комбінації з такими елементами як калій, кальцій, фтор, тощо.

Список літератури

1. Бабінець А.А., Рябцев І.О. (2021) Класифікація способів модифікування та мікролегування наплавленого металу (Огляд). *Автоматичне зварювання*, 9, 3–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.09.01>
2. Задиранов А.Н., Кац А.М. (2008) *Теоретические основы кристаллизации металлов и сплавов*. Москва, МГИУ.
3. Зубенко Л.Н. (2015) Применение модификаторов в составе функциональных покрытий. *Технологии и материалы*, 2, 20–23.
4. Антонов А.А., Артемьев А.А., Соколов Г.Н. и др. (2016) Аргодуговая наплавка порошковой проволокой с подачей модификатора в сварочную ванну. *Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та*, 15, 102–105.
5. Макаров А.В., Кудряшов А.Е., Владимиров А.А., Титова А.П. (2019) Применение наплавочных материалов, модифицированных тугоплавкими компонентами, для восста-

- новления роликов машин непрерывного литья заготовок. *Вестник Брянского гос. техн. ун-та*, **8**, 41–48.
6. Полетика И.М., Борисов М.Д., Козлов А.В. и др. (2005) Формирование структуры металла электрошлаковой наплавкой при легировании карбидами бора и хрома. *Перспективные материалы*, **4**, 78–82.
 7. Krivchikov, S.Yu. (2012) Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *The Paton Welding J.*, **6**, 19–21.
 8. Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V., Goncharenko, E.I. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *Ibid.*, **6-7**, 76–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.15>
 9. Вщенко И.П. (2007) Структура и свойства малоуглеродистых низколегируемых сталей. *Вестник МГТУ*, **94**, 558–560.
 10. Орлов Л.Н., Шарпов М.Г., Волынец В.Л. (2010) Влияние микролегирования бором на свойства металла шва при сварке судостроительных сталей рутитовыми порошковыми проволоками. *Судостроение*, **5**, 54–58.
 11. Коровин В.А., Палавин Р.Н., Леушин И.О., Костромин С.В. (2011) Микролегирование литой конструкционной стали. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, **2**, 199–207.
 12. Литвиненко-Арьков В.Б., Соколов Г.Н., Кязымов Ф.А. (2012) Структура и свойства термостойкого металла, наплавленного порошковыми проволоками с наночастицами TiCN. *Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та*, **9**, 194–197.
 13. Соколов Г.Н., Артемьев А.А., Дубцов Ю.Н. и др. (2018) Влияние азота и частиц карбонитрида титана на структуру и свойства металла системы Fe–C–Cr–Ni–Mo, наплавленного порошковой проволокой. *Омский научный вестник*, **2**, 15–19.
 14. Aleshin, N.P., Grigor'ev, M.V., Kobernik, N.V. et al. (2018) Modification of weld metal with tungsten carbide and titanium nitride nanoparticles in twin submerged arc welding. *High energy chemistry*, **52/5**, 440–445.
 15. Kuznetsov, V.D., Stepanov, D.V. (2015) Structure and properties of weld metal modified by nanooxides. *The Paton Welding J.*, **11**, 10–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.11.01>
 16. Соколов Г.Н., Лысак В.И., Трошков А.С. др. (2009) Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама. *Физика и химия обработки материалов*, **6**, 41–47.
 17. Гладкий П.В., Микаелян Г.С. (2015) Микролегирование и модифицирование износостойкого наплавленного металла. *Наплавка. Технологии. Материалы. Оборудование*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, 71–73.
 18. Зусин В.Я. (2011) Исследование модифицирования металла, наплавленного порошковой проволокой с алюминиевой оболочкой. *Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки*, **23**, 180–183.
 19. Зорин И.В., Дубцов Ю.Н., Соколов Г.Н. и др. (2020) Влияние частиц тугоплавких химических соединений на перенос металла в сварочной дуге при наплавке композиционной проволокой. *Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та*, **4**, 43–48.
 20. Бондарева О.П., Гоник И.Л. (2009) Влияние микролегирования на структуру и свойства экономнолегированной феррито-аустенитной стали 02X22H5. *Там же*, **11**, 137–140.
 21. Stepanov, K.K., Matvienko, V.N., Oldakovsky, A.I. (2011) Modification of medium-chromium deposited metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 10–12.
 22. Efimenko, N.G. (2002) Modifying, refining and alloying with yttrium in welding of steels. *Ibid.*, **6**, 8–12.
 23. Pu, J., Yu, Sh., Li, Yu. (2017) Effects of Zr–Ti on the microstructure and properties of flux aided backing submerged arc weld metals. *J. of alloys and compounds*, **692**, 351–358.
 24. Fejnberg, L.I., Rybakov, A.A., Alimov, A.N., Rosert, R. (2007) Weld microalloying with titanium and boron in multiarc welding of large diameter gas and oil pipes. *The Paton Welding J.*, **5**, 12–16.
 25. Kabatsky, V.I., Kabatsky, A.V. (2004) Effect of modifying of weld metal on delayed fracture resistance of high-strength steel welded joints. *Ibid.*, **3**, 21–25.
 26. Яковлев Д.С., Шахматов М.В. (2015) Микролегирование сварных соединений порошковой проволокой. *Технологии и материалы*, **2**, 23–28.
 27. Чигарев В.В., Кондрашов К.А., Макаренко Н.А., Грановский А.В. (2002) Наплавочный материал для плазменного упрочнения и восстановления пресс-форм. *Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки*, **12**, 153–156.
 28. Wesling, V., Schram, A., Muller, T. (2016) Influencing the arc and the mechanical properties of the weld metal in GMA-welding processes by additive elements on the wire electrode surface. *18th Chemnitz Seminar on Materials Engineering, MAR 10-11. IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*.

References

1. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O. (2021) Classification of methods of modification and microalloying of deposited metal (Review). *The Paton Welding J.*, **9**, 3-11. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.09.01>.
2. Zadiranov, A.N., Kats, A.M. (2008) *Theory of crystallization of metals and alloys*. Moscow, MGIU [in Russian].
3. Zubenko, L.N. (2015) Application of modifiers in composition of functional coatings. *Tekhnologii i Materialy*, **2**, 20–23 [in Russian].
4. Antonov, A.A., Artemiev, A.A., Sokolov, G.N. et al. (2016) Argon-arc flux-cored wire surfacing with feed of modifiers to welding pool. *Izv. Volgograd. GTU*, **15**, 102–105 [in Russian].
5. Makarov, A.V., Kudryashov, A.E., Vladimirov, A.A., Titova, A.P. (2019) Application of surfacing materials modified by refractory components for restoration of rollers of billet continuous casting machines. *Vestnik Bryanskogo GTU*, **8**, 41–48 [in Russian].
6. Poletika, I.M., Borisov, M.D., Kozlov, A.V. et al. (2005) Formation of metal structure by electroslag surfacing at alloying of boron and chrome carbides. *Perspektivnye Materialy*, **4**, 78–82 [in Russian].
7. Krivchikov, S.Yu. (2012) Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *The Paton Welding J.*, **6**, 19–21.
8. Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V., Goncharenko, E.I. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *Ibid.*, **6-7**, 76–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.15>
9. Vashchenko, I.P. (2007) Structure and properties of low-carbon low-alloyed steels. *Vestnik MGTU*, **94**, 558–560 [in Russian].
10. Orlov, L.N., Sharapov, M.G., Volynets, V.L. (2010) Influence of microalloying by boron on properties of weld metal in rutile flux-cored wire welding of shipbuilding steels. *Sudostroenie*, **5**, 54–58 [in Russian].
11. Korovin, V.A., Palavin, R.N., Leushin, I.O., Kostromin, S.V. (2011) Microalloying of cast structural steel. *Trudy NGTU*, **2**, 199–207 [in Russian].
12. Litvinenko-Arkov, V.B., Sokolov, G.N., Kyazymov, F.A. (2012) Structure and properties of heat-resistant metal, deposited by flux-cored wires with TiCN nanoparticles. *Izv. Volgograd. GTU*, **9**, 194–197 [in Russian].
13. Sokolov, G.N., Artemiev, A.A., Dubtsov, Yu.N. et al. (2018) Influence of nitrogen and titanium carbonitride particles on structure and properties of metal of Fe–C–Cr–Ni–Mo system. *Omsky Nauchny Vestnik*, **2**, 15–19 [in Russian].
14. Aleshin, N.P., Grigor'ev, M.V., Kobernik, N.V. et al. (2018) Modification of weld metal with tungsten carbide and titanium nitride nanoparticles in twin submerged arc welding. *High Energy Chemistry*, **52/5**, 440–445.
15. Kuznetsov, V.D., Stepanov, D.V. (2015) Structure and properties of weld metal modified by nanooxides. *The Paton Welding J.*, **11**, 10–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.11.01>
16. Sokolov, G.N., Lysak, V.I., Troshkov, A.S. et al. (2009) Modification of structure of metal deposited by nanodisperse tungsten carbides. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, **6**, 41–47 [in Russian].
17. Gladky, P.V., Micaelyan, G.S. (2015) Microalloying and modification of wear-resistant deposited metal. *Surfacing. Technologies. Materials. Equipment*. Kiev, PWI, 71–73 [in Russian].

18. Zusin, V.Ya. (2011) Study of modification of metal deposited by flux-cored wire with aluminium sheath. *Vestnik Priazov. GTU. Seriya: Tekhnicheskie Nauki*, 23, 180–183 [in Russian].
19. Zorin, I.V., Dubtsov, Yu.N., Sokolov, G.N. et al. (2020) Influence of particles of refractory chemical compounds on metal transfer in welding arc during surfacing by composite wire. *Izv. Volgograd. GTU*, 4, 43–48 [in Russian].
20. Bondareva, O.P., Gonik, I.L. (2009) Influence of microalloying on structure and properties of sparsely-alloyed ferritic-austenitic steel 02Kh22N5. *Ibid.*, 11, 137–140 [in Russian].
21. Stepnov, K.K., Matvienko, V.N., Oldakovsky, A.I. (2011) Modification of medium-chromium deposited metal. *The Paton Welding J.*, 8, 10–12.
22. Efimenko, N.G. (2002) Modifying, refining and alloying with yttrium in welding of steels. *Ibid.*, 6, 8–12.
23. Pu, J., Yu, Sh., Li, Yu. (2017) Effects of Zr–Ti on the microstructure and properties of flux aided backing submerged arc weld metals. *J. of Alloys and Compounds*, 692, 351–358.
24. Feinberg, L.I., Rybakov, A.A., Alimov, A.N., Rosert, R. (2007) Weld microalloying with titanium and boron in multiarc welding of large diameter gas and oil pipes. *The Paton Welding J.*, 5, 12–16.
25. Kabatsky, V.I., Kabatsky, A.V. (2004) Effect of modifying of weld metal on delayed fracture resistance of high-strength steel welded joints. *Ibid.*, 3, 21–25.
26. Yakovlev, D.S., Shakhmatov, M.V. (2015) Microalloying of welded joints by flux-cored wire. *Tekhnologii i Materialy*, 2, 23–28 [in Russian].
27. Chigarev, V.V., Kondrashov, K.A., Makarenko, N.A., Granovsky, A.V. (2002) Surfacing material for plasma strengthening and restoration of press moulds. *Vestnik Priazov. GTU, Seriya: Tekhnicheskie Nauki*, 12, 153–156 [in Russian].
28. Wesling, V., Schram, A., Muller, T. (2016) Influencing the arc and the mechanical properties of the weld metal in GMA-welding processes by additive elements on the wire electrode surface. In: *18th Chemnitz Seminar on Materials Engineering, MAR 10-11. IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*.

INFLUENCE OF MODIFICATION AND MICROALLOYING ON DEPOSITED METAL STRUCTURE AND PROPERTIES (REVIEW)

A.A. Babinets, I.O. Ryabtsev

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

Proceeding from published data, the influence of modification and microalloying by boron, titanium, tungsten, zirconium, yttrium, etc., on the deposited metal structure, mechanical and service properties is shown. It is demonstrated that addition of these elements or their compounds with carbon and nitrogen in the quantity of up to 0.2 %, allows producing a fine-grained, homogeneous structure of metal, a more uniform distribution of alloying elements, that makes a positive effect on the values of strength, ductility, wear and heat resistance. It was determined that, introducing small additives of boron or its compounds (in the quantity of up to 0.2%), cerium or yttrium (in the quantity of up to 0.015 % of each), or application of complex master alloys, which can have the above-mentioned elements in their composition, as well as such modifiers, as zirconium, titanium carbides and borides or tungsten carbides, looks promising in terms of increase of wear and heat resistance of the deposited metal. Proceeding from the performed analysis, it was also shown that addition of titanium and zirconium diborides to the composition of flux-cored wire charge, promotes activation of the processes of formation of molten metal drops at the electrode wire tip, resulting in improvement of the quality of metal transfer in the welding arc, that leads to greater values of the coefficients of alloying element transition into the deposited metal and improves deposited bead formation. 28 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: arc surfacing, deposited metal, tool steel, modification, microalloying, metal structure, wear resistance, heat resistance

Надійшла до редакції 15.07.2021

Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

III МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

12–16 вересня 2022

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей до 19.08.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі до 05.09.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску до 12.09.2022 р.

ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50
journal@paton.kiev.ua
posypalko.yurii@gmail.com
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2022>