

*Материалы Второй Всероссийской конференции по наноматериалам "НАНО 2007", 13–16 марта 2007 г., Новосибирск, 2007. – С. 478. 2. Дурягіна З.А., Лазько Г.В. Вплив комплексного лазерного легування ніобієм та азотом на характер структуроутворення в при поверхневих шарах нержавіючих сталей // Машинознавство. – 2005. – № 4 (94). – С. 51–54. 3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зув, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 4. Михаськів В.В., Журавчак Л.М., Фітель Г.В. Використання граничних і приграничних елементів у двовимірній моделі нестационарної теплопровідності // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2003. – Т. 46, № 2. – С. 155–161. 5. Савула Я.Г., Чапля Є.Я., Кухарський В.М. Чисельне моделювання тепломасопереносу через тонкий криволінійний шар // Доп. НАН України. – 1995. – № 11. – С. 30–34.*

УДК 621.791

**В.М. Палаш, А.Р. Дзюбик, Т.Р. Ступницький**  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра зварювального виробництва, діагностики і відновлення металоконструкцій

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА БУДОВУ ЗОНИ СПЛАВЛЕННЯ СІРИХ ЧАВУНІВ**

©Палаш В.М., Дзюбик А.Р., Ступницький Т.Р., 2008

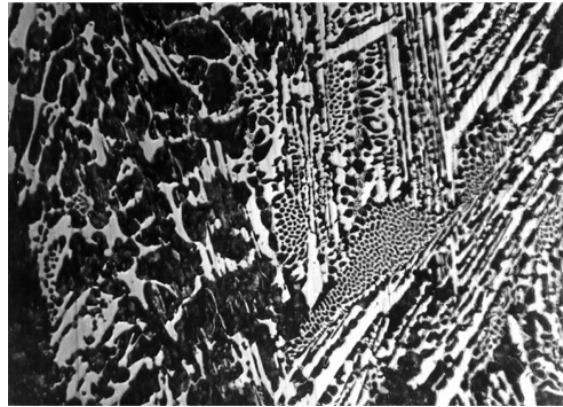
**Виконано дослідження зони сплавлення зварних з'єднань, що отримуються під час електродугового зварювання сірих чавунів сталевим дротом у вуглекислому газі без попереднього підігрівання. Показано, що величина ділянок відбілу, їх конфігурація, а також особливості первинної і вторинної структур істотно залежать від параметрів термічного циклу. Запропоновано технологічні шляхи зменшення ділянок відбілу.**

**Research of area of alloy of the welded connections which turn out at electro- arc welding of grey cast-irons by a steel wire in carbon dioxide without the previous heating is conducted. It is shown that size of areas of ledeburite, their configuration, and also the features of primary and second structure substantially depend on thermal cycle indexes. The technological ways of diminishing of areas of ledeburite are offered.**

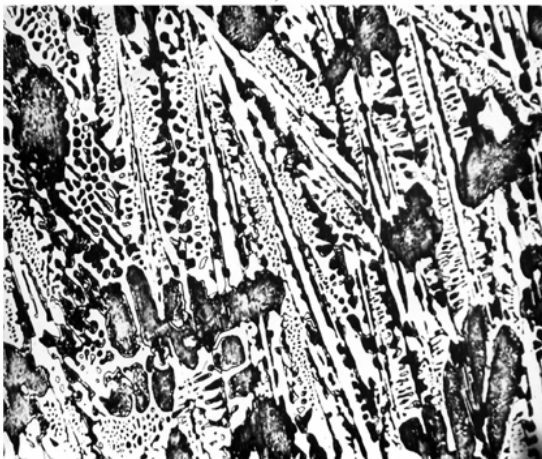
**Актуальність теми.** Сірі чавуни широко використовують як конструкційний матеріал для виготовлення багатьох деталей машин, механізмів та різних корпусних елементів. У зв'язку з цим під час їхнього ремонту доволі широко використовуються зварювальні технології, що не вимагають спеціального підігрівання, зокрема з отриманням сталевих зварних швів і наплавлених шарів. У разі електродугового зварювання та наплавлення сірих чавунів сталевим дротом без попереднього підігрівання існує велика ймовірність утворення у з'єднанні ділянок зі структурою ледеburиту, наявність якого є характерною ознакою білого чавуну (див. рисунок, а). Таке "відбілювання" найчастіше відбувається в зоні сплавлення, у тій її частині, яка знаходилась у розплавленому стані і де під час первинної кристалізації вміст вуглецю перевищував його максимальну розчинність в аустеніті за евтектичної температури. Наявність ділянок відбілу в зоні сплавлення, як правило, спричиняє значне зниження технологічної міцності внаслідок утворення гарячих і холодних тріщин (див. рисунок, д), а також погіршення експлуатаційних властивостей зварних чи наплавлених деталей внаслідок виникнення в цих місцях значної концентрації напружень. Окремі аспекти цієї проблеми досліджували раніше [1–4], але досі не має повної ясності щодо впливу на особливості будови відбілу режиму електродугового зварювання без підігрівання сірих чавунів сталевим дротом в газовому окислювальному середовищі.



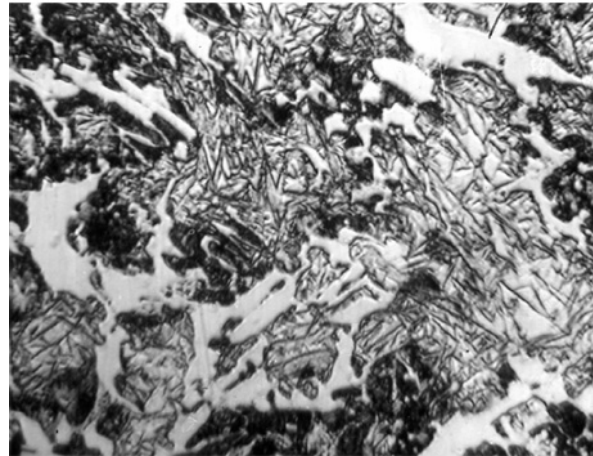
а



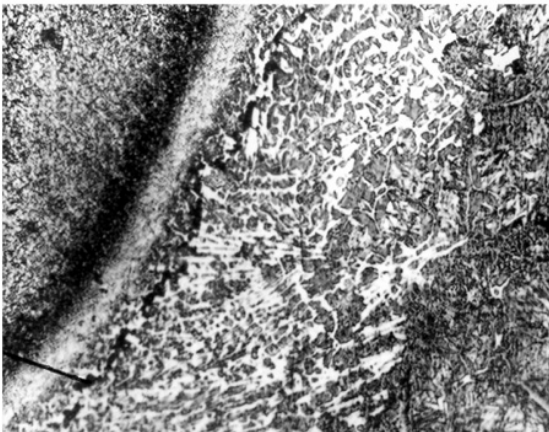
б



в



г



д



е

*Мікροструктура ділянок відбілу*

**Мета роботи.** У роботі досліджено вплив основних параметрів термічних циклів на форму, розміри та мікροструктуру ділянок відбілу, що утворюються в зоні сплавлення під час автоматичного дугового зварювання та наплавлення валиків сталевим дротом на сірі чавуни без їх попереднього підігрівання. Відомо, що саме термічні цикли істотно впливають на інтенсивність дифузійних процесів в зоні сплавлення, що значною мірою може визначати розміри та хімічний склад тієї її частини, що знаходилася в розплавленому стані. Відомо, що, окрім хімічного складу, вирішальний вплив на характер первинної кристалізації розплавленого чавуну, а значить і на можливість утворення відбілу, має швидкість охолодження, яка також визначається термічним циклом.

**Методика.** Для отримання термічних циклів, що істотно відрізнялися б своїми параметрами, автоматичне наплавлення валиків та шарів виконували сталевим дротом Св-08А у вуглекислому газі в доволі великому діапазоні значень погонних енергій (260–2000 *КДж/м*) на пластини різної товщини ( від 2 до 40 мм ) із сірого ферито-перлітного чавуну з різною формою та кількістю графітових включень ( Гф1 – Гф13 і Гроз 25–750, ГОСТ 1412 – 85), в яких вміст основних хімічних елементів становив: (2,7–3,6) % С; (1,4–2,2) % Si; (0,45–2,0) %Mn. Окрім наплавлення, здійснювали також однопрохідне та багатопрохідне зварювання встик пластин. Це забезпечило значні відмінності в умовах протікання первинної кристалізації в зоні сплавлення, що визначають її розміри, хімічний склад і швидкість охолодження. Необхідно відмітити, що хімічний склад наплавлених валиків і шарів, а також зварних швів у всіх випадках відповідав сталі з вмістом вуглецю, що залежав від співвідношенням у них часток основного та наплавленого металів, і знаходився в межах 0,4–0,9 % . Дослідження відбілу, зокрема форми і розмірів його ділянок, а також особливостей структури, здійснювалось металографічним аналізом на оптичному мікроскопі за стандартною методикою, а визначення часу існування металу в розплавленому стані та швидкостей охолодження – розрахунковим способом. При цьому, залежно від розмірів зразків та режиму зварювання, під час аналізу температурних полів використовували такі розрахункові схеми:

- лінійне рухоме джерело в тонкій пластині:

$$\Delta T = \frac{q_U}{v \cdot \delta \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot C\gamma \cdot t}} \exp \left[ -\frac{y_0}{4a \cdot t} - b \cdot t \right];$$

- потужне швидкорухоме джерело в тонкій пластині:

$$\Delta T = \frac{q_U}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot e^{\left[ -\frac{v}{2a}(x+R) \right]};$$

- рухоме точкове джерело на поверхні півнескінченного тіла з адіабатичною границею:

$$\Delta T = \frac{q_U}{2\pi \cdot \lambda \cdot v \cdot t} \cdot \exp \left[ -\frac{y_0^2 + Z_0^2}{4at} \right];$$

- потужне точкове джерело на поверхні півнескінченного тіла з адіабатичною границею:

$$\Delta T = \frac{q_U}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot e^{\left( -\frac{v \cdot x}{2a} \right)} \cdot K_0(U).$$

Тут  $\Delta T$  – зростання температури точки твердого тіла;  $q_U$  – ефективна теплова потужність джерела;  $v$  – швидкість зварювання;  $\delta$  – товщина зварюваної пластини;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $C\gamma$  – об'ємна теплоємність металу;  $t$  – час;  $R$  – просторовий радіус-вектор, віддаль точки від початку рухомої системи координат,  $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ ;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $K_0(U)$  – функція Бесселя від уявного аргументу другого роду нульового порядку;  $b$  – коефіцієнт температуропровідності пластини.

**Основні результати.** Дослідження показали, що у всіх зразках, наплавлених чи зварених на погонних енергіях в діапазоні (260–2000 *КДж/м*), в зоні сплавлення утворюється відбіл. Це свідчить про те, що швидкість охолодження під час первинної кристалізації, що була в межах (170–930 град/с), була достатньою для забезпечення перебігу кристалізації згідно з метастабільною діаграмою Fe – Fe<sub>3</sub>C. Разом з тим можна відмітити, що величина ділянок відбілу, їхня конфігурація, а також первинна і вторинна структури істотно залежать від режиму зварювання, зокрема погонної енергії, а тим самим від параметрів термічних циклів. Якщо врахувати, що розмір ділянок відбілу визначається тим об'ємом розплавленого металу, що під час первинної кристалізації мав хімічний склад чавуну, то потрібно, насамперед, брати до уваги вплив умов зварювання на утворення зони сплавлення. Під час зварювання чи наплавлення сірих чавунів сталевим дротом вона складається з двох ділянок – примежової та неповного розплавлення чавуну [3]. Примежова ділянка утворюється

внаслідок недостатнього перемішування металу зварювальної ванни в нижній її частині, внаслідок чого певний об'єм металу зберігає склад основного, тобто чавуну. У зв'язку з тим, що тут відбувається тільки молекулярна дифузія, то час існування металу в розплавленому стані може мати істотне значення в розподілі хімічних елементів за товщиною цього прошарку і тим самим впливати на розміри того об'єму, де зберігається склад чавуну. Згідно з даними [4], розмір прилежної ділянки може становити десятки частки мм.

У ділянці неповного розплавлення сірих чавунів завжди існують передумови для відбілювання, тому що за хімічним складом рідинна фаза тут є чавуном. Величина її прямо пропорційно залежить від температурного інтервалу первинної кристалізації та обернено пропорційно – від градієнта температур в ній. Значна хімічна і структурна неоднорідність чавунів істотно розширює цю ділянку, так що вона може досягати 300–400 мкм. Отже, під час зварювання сірих чавунів сталевим дротом розмір ділянки розплавленого чавуну в зоні сплавлення може становити декілька сотень мкм.

Дослідження показали, що в ділянці неповного розплавлення, на відміну від прилежної ділянки, відбіл не має чітких обрисів. Структура його здебільшого близька до евтектичної, причому продукти розпаду аустеніту, залежно від режиму зварювання, змінюються від мартенситної до перлітно-бейнітної. У цьому разі на мікроструктуру в основному впливає швидкість охолодження в температурному інтервалі перетворень аустеніту 800–900 К. За швидкостей, вищих за 54 град/с, переважає мартенситна структура (рисунок, з), а за швидкостей, нижчих за 30 град/с – перлітно-бейнітна (рисунок, в). Як вже зазначалося, в прилежній ділянці відбіл має вигляд суцільної стрічки. Мікроструктура в ньому помітно змінюється за висотою – у разі наближення до наплавленого валика кількість ледеburиту помітно зменшується (рисунок, б), що свідчить про зміну тут хімічного складу, передовсім, зменшення вмісту вуглецю.

Отримані результати показують на зв'язок розмірів відбілу з величиною погонної енергії та часом існування металу в розплавленому стані. Для їхнього аналізу потрібно брати до уваги неоднозначний вплив часу існування розплавленого металу в зоні сплавлення на його об'єм та хімічний склад. З одного боку, зона сплавлення може розширюватися за рахунок додаткового підплавлення чавуну, що контактує зі сталевим стальним валиком, а з іншого, – може звужуватися та її розплавлена частина, що має склад чавуну і з якої утворюється відбіл. Останнє може відбуватися внаслідок вирівнювальної молекулярної дифузії вуглецю в напрямку сталевої зварювальної ванни. Встановлено, що зі збільшенням погонної енергії та часу існування металу в розплавленому стані розмір ділянок відбілу в зоні сплавлення помітно зростає. Отже, це, найшвидше, зумовлюється додатковим підплавленням чавуну під час первинної кристалізації зварних швів та наплавлених валиків. Таке припущення підтверджується і тим виявленим нами фактом, що зі збільшенням часу існування чавуну у розплавленому стані кількість графітних включень в зоні сплавлення істотно зменшується (рисунок, е).

Варто відмітити, що ми не брали до уваги вплив погонної енергії на умови перебігу конвективної дифузії, що може певно впливати на величину прилежної ділянки в зоні сплавлення, а значить, і на розміри ділянок відбілу. На умови перебігу конвективної дифузії під час електродугового зварювання сірого чавуну стальним дротом можуть впливати і інші фактори. У зв'язку з цим це питання є предметом окремого дослідження.

У випадку шарів, які формувалися наплавленням окремих валиків з перекриттям, відбіл у зоні сплавлення, як правило, не є суцільним, а розмір його ділянок менший, ніж під час наплавлення одиничних валиків. Аналогічна картина існує і у разі зварювання за декілька проходів. Такі результати, найшвидше, зумовлені меншою часткою чавуну в наплавлених шарах та багатошарових швах, ніж під час наплавлення окремих валиків та під час отримання одношарових швів.

**Висновки.** Виконані дослідження показали, що під час електродугового зварювання та наплавлення сірих чавунів сталевим дротом у вуглекислому газі без попереднього підігрівання в зоні сплавлення завжди утворюється відбіл. Разом з тим можна відмітити, що величина ділянок відбілу, їхня конфігурація, а також особливості первинної і вторинної структур істотно залежать від таких параметрів термічного циклу, як час перебування металу у розплавленому стані та швид-

костей охолодження в діапазоні температур первинної кристалізації чавуну та температур перетворення аустеніту під час охолодження. Для зменшення розмірів ділянок відбілу необхідно скорочувати час знаходження металу в розплавленому стані за рахунок наплавлення чи зварювання на менших погонних енергіях, але при цьому здебільшого продуктом розпаду аустеніту є мартенсит. Доволі радикальним способом зменшення розмірів ділянок відбілу в зоні сплавлення є наплавлення шарів з достатнім перекриттям валиків та здійснення зварювання за декілька проходів.

1. Грецкий Ю. Я. Влияние состава сварочной ванны на условия кристаллизации металла у границы сплавления при дуговой сварке чугуна // Автоматическая сварка. – 1980. – № 12. – С. 18–23.  
2. Грабин В.Ф., Грецкий Ю.Я., Крошина Г.М., Метлицкий В.А. Металлография сварных соединений чугуна. – К.: Наук. думка, 1987. – 192 с. 3. Палаш В. М. Металознавчі аспекти зварності залізо-вуглецевих сплавів: Навч. посібник. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2003. – 236 с. 4. Елистратов П.С., Елистратов А.П. Сварка чугуна сталью. – Минск: Наука и техника, 1984. – 208 с.