

УДК 669.14.017:620.192

Парахневич Є. М.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машин і технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: 1028913@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6674-5609

## ВПЛИВ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ХІМІЧНИЙ СКЛАД НЕМЕТАЛЕВИХ ВКРАПЛЕНЬ І ЗОНИ СПЛАВЛЕННЯ

**Мета роботи.** Потрібно визначити фактори, які впливають на хімічний склад зони сплавлення і неметалевих вкраплень при проведенні електрошлакового наплавлення, яке використовується при відновленні деталей залізничного транспорту, а саме електровозів марок ЧС-4, ЧС-6, ЧС-8 і ін.

**Методи дослідження.** Хімічний склад неметалевих вкраплень досліджували на установці рентгеноспектрального мікроаналізу «САМЕСА» і растровому електронному мікроскопі «SUPRA 40 WDS» виробництва Carl Zeiss (Німеччина). Похибка вимірювань – не більше 1 %. Природу неметалевих вкраплень (мікроструктуру, морфологію і топографію) вивчали петрографічним методом за допомогою комплексної методики. Зразки для досліджень вирізали з металу дослідних наплавлень таким чином, щоб зона сплавлення знаходилася посередині зразка. Для виявлення зони сплавлення проводилося хімічне травлення металу 4 % розчином сірчаної кислоти.

**Отримані результати.** В результаті вивчення хіміко-мінералогічної природи неметалевих вкраплень показано, що в металі основи (сталь Ст.3) при наближенні до зони сплавлення зменшуються кількість і розміри неметалевих вкраплень, а також змінюються їх форма, мікроструктура і склад. В зоні нагріву (безпосередньо біля зони сплавлення) практично відсутні неметалеві вкраплення.

**Наукова новизна.** Показано, що вміст елементів від металу основи до наплавленого практично не змінюється за винятком хрому, вміст якого плавно підвищується від сталі Ст.3 до сталі 12Х13 по зоні сплавлення.

**Практична цінність.** Результати роботи дозволяють пояснити вплив електрошлакового відновлення деталей електровозів на якість зони сплавлення і пояснити механізм виникнення дефектів структури і можливі види неметалевих вкраплень в результаті наплавлення.

**Ключові слова:** електрошлаковий перепплав, неметалеві вкраплення, перехідна зона, мікроструктура, морфологія.

### Вступ

В процесі електрошлакового наплавлення (ЕШН) як в зоні сплавлення, так і в металі основи відбуваються значні зміни структури і неметалевих вкраплень. Ці зміни відбуваються при наплавленні однорідних і близьких за хімічним складом сталей. При наплавленні різнорідних за хімічним складом сталей не вивчений вплив ЕШН на структуру і неметалеві вкраплення.

### Аналіз досліджень та публікацій

Механізм утворення ендогенних неметалевих вкраплень досить складний, тому що на формування зони сплавлення і відповідно неметалеві вкраплення (їх розподіл, морфологію) суттєво впливає режим електрошлакового наплавлення. Як показують дослідні наплавлення, температура в зоні сплавлення сягає близько 1700–2000°C, що призводить до розплавлення і дифузії неметалевих вкраплень з металу основи до рідкої металевої ванни [3]. Для електрошлакового процесу характерні дуже розвинені поверхні реагування металевої і шлакової фаз. Такими поверхнями є: поверхня зануреного в шлакову ванну кінця витратного електрода; поверхня крапель електродного металу, який рухається в шлаковій

ванні; поверхня розділу металевої і шлакової ванн. Розмір міжфазної поверхні залежить, головним чином, від розміру крапель рідкої сталі, які утворюються на торці електрода в шлаковій ванні. Це складний процес, на хід якого впливає поверхневий натяг на межі метал-шлак [4]. Він залежить від складу і температури обох фаз і від електродинамічної сили. Більша частина крапель має правильну форму кулі. Механізм утворення ендогенних неметалевих вкраплень в зоні сплавлення при наплавленні різнорідних за хімічним складом сталей розглянуто в роботі [5]. Крім сприятливого впливу електрошлакового перепплавлення на неметалеві вкраплення, також зменшується вміст шкідливих газів (кисню і азоту) [6]. Видалення всіх цих елементів має велике значення як для забезпечення якості металу, так і для отримання зливка без дефектів структури. За даними роботи [7] встановлено, що при будь-якому способі наплавлення в металі проходять структурні зміни, які приводять до збільшення розмірів зерна та погіршенню показників міцності металу основи. У роботі [8] з'ясовано, як зміна форми рідкої металевої ванни може впливати на повноту видалення шлакових часток. При збільшенні глибини конусної частини металевої ванни підвищується вірогідність захвату неметалевих вкраплень гілками дендритів.

Підвищення швидкості наплавлення зливка призводить до підвищення вмісту неметалевих вкраплень. Це пояснюється тим, що зменшується кількість вкраплень, які випливають на поверхню металевої ванни. В умовах ЕШП можливе впливання вкраплень розміром більше 15 мкм, тому що швидкість випливання вкраплень менших розмірів співставна зі швидкістю наплавлення промислових зливок. Це означає, що якщо зменшити швидкість наплавлення до нижнього рівня, можна підвищити кількість видалених вкраплень завдяки додатковому впливанню дрібних часток [8]. Головними факторами, які обумовлюють міцність з'єднання різновидних металів є їх хімічний склад і технологія сплавлення [9]. Шлаки розрізняють на «довгі» і «короткі». «Довгим» шлакам властива низька в'язкість і незначна її зміна при підвищенні температури. Для «коротких» шлаків характерна значна зміна в'язкості при невеликій зміні температури. Для отримання якісного зливка із чистою поверхнею при ЕШП потрібно застосовувати «довгі» шлаки [10].

При використанні «довгих» шлаків можливо в більш широких межах змінювати тепловий режим наплавлення. При усіх рівних умовах, чим «коротший» шлак, тим товстіший гарнісаж і гірше якість напавленої поверхні. Використання дуже в'язкого шлаку може призвести до віджимання формують пристроїв від кромки основного металу. Шлак повинен мати високу адгезію до неметалевих вкраплень. Такими є фторидні шлаки, які мають підвищену адгезію до неметалевих вкраплень типу корунду, кварцового скла, діоксида цирконію [10]. Найліпша адсорбція неметалевих вкраплень шлаком спостерігається при максимальному міжфазному натягу на межі шлак – тверді вкраплення і куту змочування менше 90°. Фторидні шлаки, які містять 45...90 %  $\text{CaF}_2$ , ліпше ніж оксидні змочують вкраплення глинозему й кремнезему. Однак шлак, який містить 90 %  $\text{CaF}_2$  і 10 %  $\text{CaO}$  повільно розчиняє неметалеві вкраплення ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ). Шлаки системи  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , а також шлак АНФ-6-1 добре змочують нітриди перехідних металів і погано – нітрид бора. Адгезія до шлаків зменшується з підвищенням вмісту в них  $\text{SiO}_2$ , за винятком нітриду бора, для якого спостерігається зворотна залежність. Адгезія нітридів перехідних металів до шлаку підвищується разом із вмістом у ньому вуглецю, і при певних умовах може бути вища до сталі, ніж до шлаку. Для рафінування сталі найбільш придатний шлак з 50 %  $\text{CaO}$  і 50 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Між шлаком і металом повинен бути достатньо високий поверхневий натяг, тому це сприяє ліпшому відділенню шлакового гарнісажу і попереджає заплутування шлаку в металі.

В роботі [11] на основі термодинамічного аналізу оцінили можливість азотування металу з газової фази. Показано, що в камерних печах ЕШП при використанні шлаків системи  $\text{Ca}-\text{CaF}_2$  і атмосфери азоту створюються необхідні умови для переходу

азоту в метал у кількості, достатній для легування. Різниця густини рідкого шлаку і рідкого металу має велике значення в процесі ЕШП. Це пов'язано з тим, що від різниці густини залежить тривалість контакту металу зі шлаком, а це визначає ефективність відділення шлаку від металу. Знання густини рідкого шлаку при високій температурі необхідно для розрахунку оптимальної маси шлаку. Густина шлаку залежить як від його складу, так і від температури [12]. Заміна 30 % фтористого кальцію на 30 % вапна підвищує густина шлаку до 2,72 г/см<sup>3</sup>, а заміна 30 % фтористого кальцію на 30 % глинозему підвищує густина до 2,93 г/см<sup>3</sup>.

Наплавлення проводили у стик, тому що такий спосіб є економічно ефективним способом відновлення деталей. Важкість використання цього способу полягає в тому, що в початковий період процесу (процесу розводки) необхідно отримати якісне з'єднання основного металу з напавленим [13, 14]. Це досягається за умови розплавлення металу основи деталі по всьому перетину кристалізатора. У зв'язку з тим, що при стандартній методиці в деяких варіантах наплавлень не виявлялася повною мірою будова зон сплавлення, була розроблена комплексна методика їх виявлення і дослідження. Зону сплавлення виявляли за допомогою теплового методу (нагрівання зразка до появи зони сплавлення, тобто зміни кольору одного з металів або двох), методом переполірування шліфа і комбінованим методом (хімічне + теплове травлення, переполірування + теплове травлення) [15]. Така методика дозволяє чітко визначити зону сплавлення, відповідно і точно визначити розподіл і розміри неметалевих вкраплень в відновлених деталях.

### Мета роботи

В результаті дослідження потрібно визначити фактори, які впливають на хімічний склад зони сплавлення і неметалевих вкраплень при проведенні електрошлакового наплавлення, яке використовується при відновленні деталей залізничного транспорту, а саме електровозів марок ЧС-4, ЧС-6, ЧС-8 та ін.

### Матеріал і методика досліджень

Хімічний склад неметалевих вкраплень досліджували на установці рентгеноспектрального мікроаналізу «CAMECA» і растровому електронному мікроскопі «SUPRA 40 WDS» виробництва Carl Zeiss (Німеччина). Похибка вимірювань – не більше 1 % [1]. Природу неметалевих вкраплень (мікроструктуру, морфологію і топографію) вивчали петрографічним методом за допомогою комплексної методики [2]. Зразки для досліджень вирізали з металу дослідних наплавлень таким чином, щоб зона сплавлення знаходилася посередині зразка.

### Результати досліджень

Неметалеві вкраплення в металі основи (сталь Ст.3) представлені переважно сульфідами, оксидами і

оксисульфідами. При наближенні до зони сплавлення зменшуються кількість і розміри неметалевих вкраплень, а також змінюються їх форма, мікроструктура і склад (рис. 1а–з). Також слід відзначити, що в зоні нагріву (безпосередньо біля зони сплавлення) практично відсутні неметалеві вкраплення. Це однорідна (гомогенна) зона шириною 75...100 мкм з дещо заниженим рельєфом і низькою відбивною здатністю. Кількість неметалевих вкраплень в зоні сплавлення незначна, вони розподіляються нерівномірно (в деяких ділянках спостерігаються скупчення, а в інших вони повністю відсутні). Більшість вкраплень мають глобулярну форму, аморфну (скловидну) мікроструктуру, багатокомпонентний хімічний склад. Розмір глобулярних вкраплень переважно 1...10 мкм, подекуди спостерігаються поодинокі вкраплення розміром 15...30 мкм. Крім цих вкраплень в зоні сплавлення спостерігаються більш легкоплавкі вкраплення, які мають плівкову, еліпсоїдну або глобулярну форму і відрізняються присутністю дендритовидних часток субоксидів Mn і Cr.

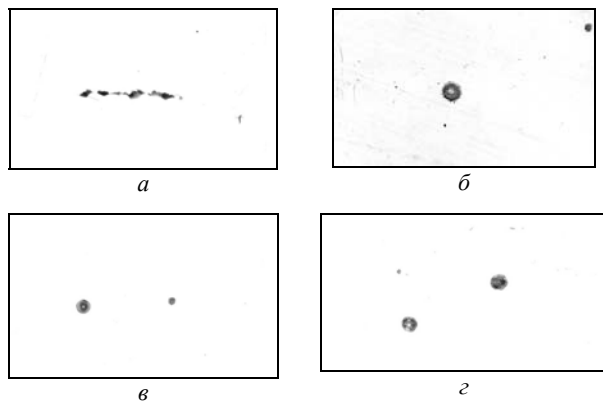


Рисунок 1. Неметалеві вкраплення в зоні нагріву:

а – залишки оксидів; б – лінзовидна форма оксидів; в, з – глобулярна форма оксидів,  $\times 950$

За даними рентгеноспектрального мікроаналізу дендритовидних часток в складі плівкоподібних вкраплень зафіксований підвищений вміст хрому і марганцю, а в складі аморфної матриці – високий вміст кальцію і марганцю, а також кремній, алюміній і хром. Аналогічний вміст зафіксований в складі вкраплень глобулярної форми. В наплавленому металі 12X13, на відміну від сталі Ст.3, присутні оксидні вкраплення системи  $AlO-Al_2O_3$  розміром 3...5 мкм. Це ізометричні частки  $Al_2O_3$ ,  $Al_3O_4$ , тверді розчини  $AlO-Al_2O_3$  і ін., що співпадає з даними роботи [3]. Рідко зустрічаються кристали нітриду титана і голчасті кристали нітриду алюмінію  $AlN$ .

Рентгеноспектральний аналіз показав, що вміст елементів від металу основи до наплавленого практично не змінюється за винятком хрому, вміст якого помітно підвищується від сталі Ст.3 до сталі 12X13 по зоні сплавлення (рис. 2). Крім того, наявні невеликі збільшення концентрації в сталі Ст.3 вуглецю, нікелю, кисню та кальцію.

На рис. 3 показано спектральний якісний аналіз неметалевого вкраплення. Відповідно до рентгеноспектрального аналізу, склад неметалевого вкраплення відповідає сульфід марганцю ( $MnS$ ).

На рисунку 4 представлено якісний аналіз розподілу елементів характерного вкраплення для сталі 12X13. Як видно з рисунку, такий склад вкраплення відповідає силкату складного хімічного складу.

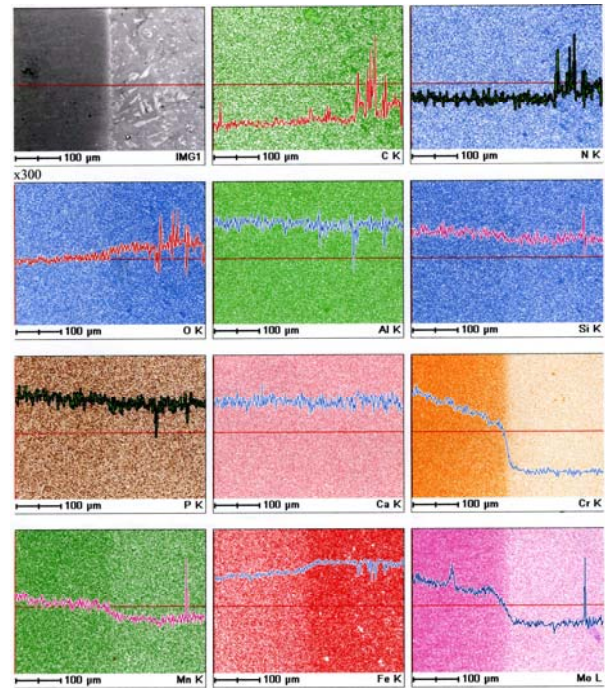


Рисунок 2. Розподіл елементів в зоні сплавлення

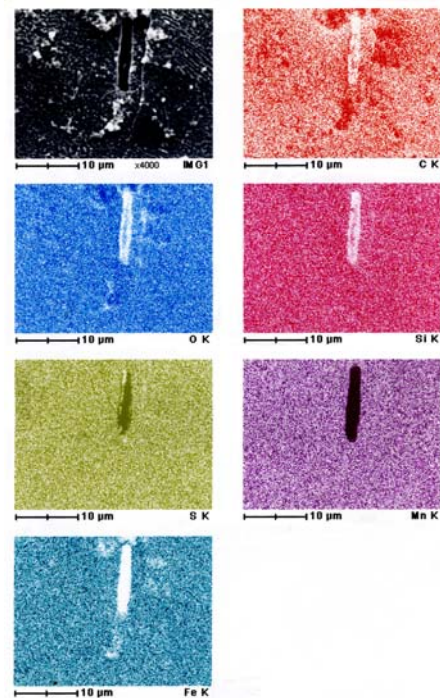


Рисунок 3. Якісний аналіз сульфід марганцю в сталі Ст.3 за елементами

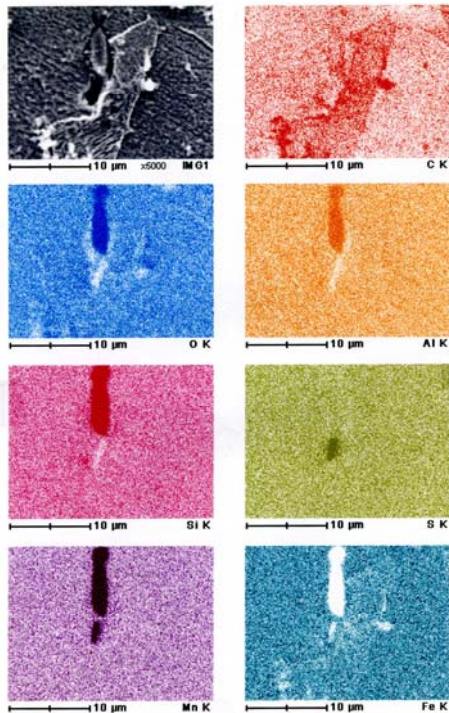


Рисунок 4. Якісний аналіз силкату за елементами

#### Обговорення

В результаті вивчення хіміко-мінералогічної природи неметалевих вкраплень показано, що в металі основи (сталь Ст.3) при наблизненні до зони сплавлення зменшуються кількість і розміри неметалевих вкраплень, а також змінюються їх форма, мікроструктура і склад. В зоні нагріву (безпосередньо біля зони сплавлення) практично відсутні неметалеві вкраплення.

#### Висновки

Встановлено, що вміст елементів від металу основи до наплавленого практично не змінюється за винятком хрому, вміст якого плавно підвищується від сталі Ст.3 до сталі 12X13 по зоні сплавлення.

#### Список літератури

1. Комплексный контроль качества конструкционной стали : под ред. Ю.А. Шульте. – К. : Техника, 1986. – 126 с.
2. Литвинова Т.И. Петрография неметаллических включений / Т. И. Литвинова, В. П. Пирожкова, А. К. Петров. – М. : Металлургия, 1972. – С. 184.
3. Рябцев И.А. Электрошлаковая наплавка. Часть 2. [Текст] / И.А. Рябцев, Ю.А. Кусков // Сварщик. – 2001. – № 1. – С. 26 – 32.
4. Лунев В. В. Сера и фосфор в стали / В. В. Лунев, В. В. Аверин – М. : Металлургия, 1988. – 256 с.

5. О трансформации неметаллических включений в процессе электрошлаковой наплавки / Ю. П. Петруша, В. В. Лунев, В. П. Пирожкова [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 2. – С. 19–24.

6. Формирование структуры и свойств высоколегированных коррозионно-стойких сталей при электрошлаковом переплаве / А. Л. Комнацкий, Т. А. Роик, А. М. Марченко [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2003. – № 2. – С. 3–9.

7. Матвеев В. В. Восстановление вагонных колес наплавкой с предварительным отжигом поверхности катания / В. В. Матвеев // Автоматическая сварка. – 2005. – № 11. – С. 36–40.

8. Электрошлаковый процесс, обладання, технологія : зб. наук. праць / Луньов В. В., Парахневич Є. М., Петруша Ю. П. [и др.] – Запоріжжя : ЗНТУ, 2003. – 56 с.

9. Цыкуленко К. А. Некоторые аспекты формирования наплавленного слоя при порционной электрошлаковой наплавке с применением жидкого присадочного материала / К. А. Цыкуленко // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2007. – № 2. – С. 7–11.

10. Рябцев И. А. Электрошлаковая наплавка. Часть 1. / И. А. Рябцев, Ю. А. Кусков // Сварщик. – 2000. – № 6. – С. 26–31.

11. Легирование металла азотом из газовой фазы в процессе ЭШП / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, Е. Л. Корзун [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2002. – № 4. – С. 3–8.

12. Парахневич Є. М. Відновлення деталей електрошлаковим методом / Є. М. Парахневич, Б. С. Сперанський, Ю. П. Петруша // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2000. – № 2. – С. 49–51.

13. Якісні показники властивостей металу деталей, відновлених електрошлаковим методом : зб. наук. праць за матеріалами ІХ міжнар. наук. - техн. конф., 18–22 вересня 2000 р. / відп. ред. Луньов В. В. – Запоріжжя : ЗДТУ, 2000. – 112 с.

14. Парахневич Є. М. Особливості технології відновлення деталей електрошлаковим методом / Є. М. Парахневич, Ю. П. Петруша, В. В. Луньов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 60–62.

15. Методика выявления зоны сплавления при электрошлаковой наплавке / Е. Н. Парахневич, Ю. П. Петруша, В. В. Лунев [и др.] // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 5. – С. 66–68.

Одержано 21.08.2023

## THE INFLUENCE ELECTROSLAG HARD-FACING ON THE CHEMICAL COMPOUND OF NONMETALLIC INCLUSIONS AND FUSION ZONE

Parahnevich E. Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department “Machinery and Technology of Foundry”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: 1028913@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6674-5609

**Purpose.** As a result of the study, it is necessary to determine the factors that influence the chemical composition of the fusion zone and non-metallic inclusions during electroslag surfacing, which is used in the restoration of railway transport parts, namely electric locomotives of the ЧС-4, ЧС-6, ЧС-8, etc. brands.

**Research methods.** The chemical composition of non-metallic inclusions was studied using the CAMECA X-ray spectroscopic microanalysis unit and the "SUPRA 40 WDS" scanning electron microscope manufactured by Carl Zeiss (Germany). The measurement error is no more than 1 %. The nature of non-metallic inclusions (microstructure, morphology and topography) was studied by the petrographic method using a complex methodology. Samples for research were cut from the metal of the experimental deposits in such a way that the fusion zone was located in the middle of the sample. Chemical etching of the metal with a 4% solution of sulfuric acid was carried out to identify the fusion zone.

**Results.** As a result of the study of the chemical and mineralogical nature of non-metallic inclusions, it is shown that in the base metal (Cm.3 steel) when approaching the fusion zone, the number and size of non-metallic inclusions decrease, as well as their shape, microstructure and composition change. There are practically no non-metallic inclusions in the heating zone (immediately near the fusion zone).

**Scientific novelty.** It is shown that the content of elements from the base metal to the deposited metal practically does not change, with the exception of chromium, the content of which gradually increases from Cm.3 steel to 12X13 steel in the fusion zone.

**Practical value.** The results of the work make it possible to explain the effect of electroslag restoration of electric locomotive parts on the quality of the fusion zone and to explain the mechanism of structure defects and possible types of non-metallic inclusions as a result of surfacing.

**Key words:** electroslag remelting, non-metallic inclusions, transition zone, microstructure, morphology.

## References

1. Tsyvirko. E. I. (1986). Complex quality control of structural steel [Complex quality control of structural steel]. Tehnika, 126.
2. Lytvynova T. Y., Pirozhkova V. P., Petrov A. K. (1972) Petrography of non-metallic inclusions [Petrography of non-metallic inclusions]. – Moscow, Metallurgy, 184.
3. Ryabtsev I. A., Kuskov Yu. A. (2000). Electroslag surfacing. Part 2. [Electroslag surfacing. Part 2.]. Welder, 1, 26–32.
4. Lunev V. V., Averin V. V. (1988) Sulfur and phosphorus in steel. – Moscow, Metallurgy. 256.
5. Petrusha Yu. P., Lunev V. V., Pirozhkova V. P. [and others] (2007). On the transformation of non-metallic inclusions in the process of electroslag surfacing [On the transformation of non-metallic inclusions in the process of electroslag surfacing]. Theory and practice of metallurgy, 2–3, 19–24.
6. Komnatsky A. L., Roik T. A., Marchenko A. M. et al. (2003). Formation of the structure and properties of high-alloyed corrosion-resistant steels during electroslag remelting [Formation of the structure and properties of high-alloyed corrosion-resistant steels during electroslag remelting]. Problems of special electrometallurgy, 2, 3–9.
7. Matveev V. V. (2005). Restoration of wagon wheels by surfacing with preliminary annealing of the rolling surface [Restoration of wagon wheels by surfacing with preliminary annealing of the rolling surface]. Automatic quarrel, 11, 36–40.
8. Lunyov V. V., Parahnevich E. M., Petrusha Yu. P. et al. (2003). Electroslag process, equipment, technology: coll. of science works. Zaporizhzhia: ZNTU (Ukraine), 56.
9. Tsykulenko K. A. (2007). Some aspects of the formation of the deposited layer in portioned electroslag surfacing with the use of liquid additive material [Some aspects of the formation of the deposited layer in portioned electroslag surfacing with the use of liquid additive material]. Problems of special electrometallurgy, 2, 7–11.
10. Ryabtsev I. A., Kuskov Yu. A. (2000). Electroslag surfacing. Part 1. [Electroslag surfacing. Part 1.]. Welder, 6, 26–31.
11. Ryabtsev A.D., Troyanskyi A.A., Korzun E.L. [and others] (2002). Alloying of metal with nitrogen from the gas phase in the process of ESH [Alloying of metal with nitrogen from the gas phase in the process of ESH]. Problems of special electrometallurgy, 4, 3–8.
12. Parahnevich E. M., Speranskyi B. S., Petrusha Yu. P. (2000). Restoration of parts by the electroslag method [Restoration of parts by the electroslag method]. New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering, 2, 49–51.
13. Parahnevich E. M. (2000). Qualitative indicators of metal properties of parts restored by the electroslag method. International of science-technical conference. Zaporizhzhia: ZDTU (Ukraine), 112.
14. Parahnevich E. M., Petrusha Yu. P., Lunev V. V. (2003). Features of the technology of restoration of parts by the electroslag method [Features of the technology of restoration of parts by the electroslag method]. New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering, 1, 60–62.
15. Parakhnevich E. M., Petrusha Yu. P., Lunev V. V. et al. (2007). Techniques for identifying the fusion zone in electroslag surfacing [Techniques for identifying the fusion zone in electroslag surfacing]. Vostochno – European journal of advanced technologies, 5, 66–68.