

Є.М. Парахнєвич¹, канд. техн. наук, доц., доц., e-mail: g1028913@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6674-5609>

Є.І. Івахненко¹, канд. техн. наук, доц., доц., e-mail: ivakhnenko.ie.zp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0210-2575>

Ю.П. Петруша¹, канд. техн. наук, доц., доц., e-mail: verba2204@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7359-4757>

В.В. Кудін¹, канд. техн. наук, доц., доц., e-mail: vadim.kudin1973@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8553-6685>

О.С. Воденнікова², канд. техн. наук, доц., доц., e-mail: oksana_vodennikova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0496-5435>

¹Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

²Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

Особливості розподілу неметалевих вкраплень при електрошлаковому наплавленні з великим вмістом сірки

На сьогодні в машинобудуванні досить гостро стоїть питання якості деталей. Як правило, більшість деталей виготовляється з виливків, отриманих різними методами. Основне завдання, що стоїть перед ливарним виробництвом у нашій країні, полягає в істотному загальному підвищенні якості виливків, яке виражається в зменшенні товщини стінок, зниженні припусків на механічну обробку й на ливниково-живильні системи при збереженні потрібних експлуатаційних властивостей виробів. Кінцевим підсумком цієї роботи повинне бути забезпечення збільшених потреб машинобудування необхідною кількістю литих заготовок без істотного росту загального випуску виливків по масі. Високі експлуатаційні характеристики виливків істотно залежать від чистоти сплавів за вмістом шкідливих домішок і неметалевих вкраплень. Для сталі дуже шкідливою домішкою є сірка, яка в навіть невеликій кількості істотно знижує її механічні властивості. Особливо це актуально для деталей, які працюють у важких умовах роботи (знакозмінні навантаження, підвищена температура та інше).

В даній статті наведено результати дослідження розподілу неметалевих вкраплень і сірки в зоні сплавлення, перехідній зоні і металі основи при електрошлаковому наплавленні різномірних за хімічним складом сталей з великим вмістом сірки. Показано, що кількість сірки в металі, навіть при великих її концентраціях, не впливає на чистоту зони сплавлення за вмістом неметалевих вкраплень. Інтенсивне очищення зони сплавлення і перших порцій металу, що наплавляється, відбувається завдяки великій поверхні реагування з високоактивним рідким фторидним флюсом і високій температурі шлакової ванни. В результаті протікання цих процесів неметалеві вкраплення подрібнюються, зменшується їх кількість, і вони рівномірно розподіляються за об'ємом металу. Відповідно, неметалеві вкраплення в зоні сплавлення мають сприятливу глобулярну форму, вони дрібні за розміром і рівномірно розподілені за об'ємом металу, що сприяє збільшенню рівня механічних властивостей сталей, тому що їх розмір не перевищує так званих «критичних» розмірів вкраплень.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, кристалізатор, неметалеві вкраплення, сульфід, структура, зона сплавлення.

Вступ. Якість машинобудівної продукції залежить від якості вихідного металу і рівня технології, яку застосовують при виробництві заготовок і деталей. Сьогодні стан заготівельного виробництва в машинобудуванні обумовлює загальний технічний рівень продукції.

Великі можливості ефективності заготівельного виробництва відкриваються завдяки застосуванню електрошлакової технології, зокрема, електрошлакового переплавлення (ЕШП). В процесі ЕШП в результаті рафінування активним шлаковим розплавом метал, який переплавляється, очищується від

шкідливих домішок, газів, неметалевих вкраплень, а направлена знизу догори кристалізація зливка обумовлює формування щільної структури [1]. Як різновид електрошлакової технології існує електрошлакове наплавлення (ЕШН). За допомогою ЕШН стало можливим відновлювати зношені деталі. В основу технології електрошлакового відновлення деталей закладено спосіб переплавлення електрода в мідному кристалізаторі, який охолоджується водою. Відновлення деталі складається з наплавлення замість зношеного елемента електрошлакової заготовки відповідної форми з певними припусками на

механічне оброблення [2].

Широке застосування знаходить виробництво заготовок методом електрошлакового приплавлення, коли до електрошлакової заготовки, прокату або поковки приплавляють патрубки, штуцера та інше [3, 4]. Електрошлакове приплавлення є методом збільшення розмірів заготовок і відкриває нові можливості виготовлення складних високоякісних деталей. Найбільш ефективно ця технологія застосовується при виготовленні патрубків на корпусах парогенераторів і сепараторах пару атомних електростанцій [5, 6], посудин високого тиску [7, 8].

Вилучення шкідливих домішок при електрошлаковому наплавленні є однією із умов одержання високоякісних зон сплавлення. Особливо це стосується такого елементу, як сірка. Процес видалення сірки (десульфурація металу) — це головна умова отримання якісної сталі, причому у сталеплавильному агрегаті (кисневому конвертері або електросталеплавильній печі) видаляється до 30 % сірки, а при позапічній обробці — до 90 % [9—11].

Десульфурація металу при ЕШП за даними робіт [12, 13] проходять на наступних трьох поверхнях: на межі «шлак — оплавлений електрод» вилучається близько 67 %, на поверхні розділу «шлак — крапля металу» — 8 % і на межі «шлакова і металева ванни» — 25 %. Найбільш важливими показниками рафінування металу при ЕШП є видалення сірки, кисню й інших домішок. Ступінь десульфурації при ЕШП у відкритому кристалізаторі складає 70—80 % [14].

Ефект очищення металу при ЕШП тим вище, чим більше метал забруднений домішками. Зі зменшенням вмісту домішок ефект очищення зменшується, однак ступінь чистоти металу (глибина рафінування) підвищується. Незначне підвищення вмісту вуглецю, фосфору й сірки сприяє отриманню рівновісних структур [15]. Розширення досліджень в області вивчення впливу вмісту неметалевих включень на фізико-хімічні властивості та структуру металу залишається актуальним питанням в металургійній галузі [16—18].

Постановка задачі. При стандартній кількості сірки в металі при електрошлаковому наплавленні визначити її розподіл внаслідок значної десульфурації високоактивним флюсом досить важко, тому стоїть задача в дослідженні механізму видалення сірки в процесі електрошлакового наплавлення.

Мета роботи. Мета роботи — визначення характеру розподілу неметалевих включень і сірки в зоні сплавлення, перехідній зоні і металі основи при електрошлаковому наплавленні різнорідних за хімічним складом сталей з великим вмістом сірки.

Об'єкт та методика дослідження. *Об'єктом дослідження* є наплавлений електрошлаковим методом метал, в якому великий вміст сірки як основи (підкладки), так і в наплавленому металі методом ЕШН. *Предметом дослідження* є вплив технології електрошлакового наплавлення на забрудненість металу сіркою і неметалевими включеннями.

Матеріали та методика дослідження. Підвищену концентрацію сірки в електрошлаковому металі отримували за наступною схемою: в сталь 20 і сталь

12Х13 додавали сірчане залізо при переплавленні в індукційній печі типу ІСТ-0,04. З цих плавок метал розливали в піщано-глинисті форми для отримання електродів діаметром 50 мм і подальшого їх переплавлення, а також підкладки діаметром 100 мм, на які відповідно проводилися наплавлення. Хімічний аналіз металу отриманих електродів і підкладок показав вміст сірки в сталі 20 — 0,08 %, сталі 12Х13 — 0,06 %. Наступний етап: методом ЕШН на флюсі марки АНФ-6-1 проводили експериментальне наплавлення на установці для електрошлакового відновлення, створеної на базі апарату для зварювання пластинчастим електродом А-550У і трансформатора для зварювання ОСУ-80/0,5 за схемою: на сталь 20 наплавляли сталь 20, на сталь 20 — сталь 12Х13, на сталь 12Х13 — сталь 12Х13 і на сталь 12Х13 — сталь 20. Для переплаву вибрали найбільш розповсюджений для електрошлакового процесу шлак на основі $\text{CaF}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ марки АНФ-6-1, оскільки він якнайкраще забезпечує очищення металу від шкідливих домішок і неметалевих включень. Основними компонентами цих шлаків вважають ті, вміст яких у шлаку складає більше 10 %.

Процес наплавлення деталей відбувається за схемою, яка представлена на рис. 1. Наплавлення проводили у стик, тому що такий спосіб є економічно ефективним способом наплавлення. Важкість використання цього способу полягає в тому, що в початковий період процесу (процесу розводки) необхідно отримати якісне з'єднання основного металу з наплавленим [19, 20]. Це досягається за умови розплавлення металу основи по всьому перетину кристалізатора.

У зв'язку з тим, що при стандартній методиці в деяких варіантах наплавлень не виявлялася повною мірою будова зон сплавлення, було розроблено комплексну методику їх виявлення і дослідження. Зону сплавлення виявляли за допомогою теплового методу (нагрівання зразка до появи зони сплавлен-

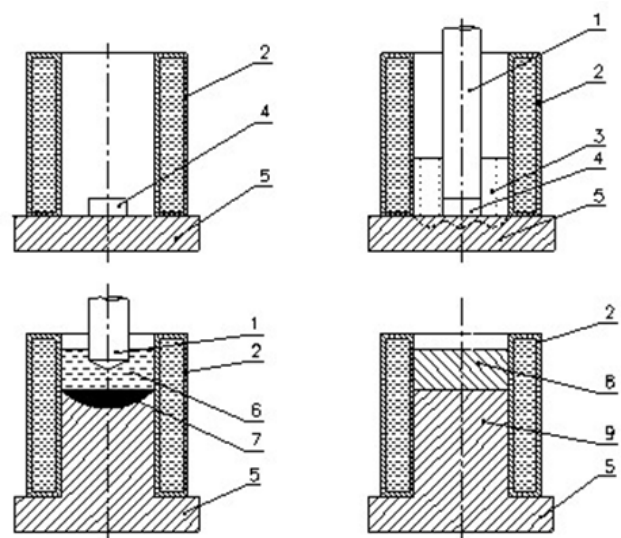


Рис. 1. Схема наплавлення: 1 — електрод, що витрачається; 2 — мідний кристалізатор; 3 — флюс; 4 — опір, що витрачається; 5 — підкладка; 6 — рідкий флюс; 7 — металева ванна; 8 — шлакова шапка; 9 — наплавлена частина

ня, тобто зміни кольору одного з металів або двох), методом переполірування шліфа і комбінованим методом (хімічне травлення + теплове травлення, переполірування + теплове травлення) [21]. Для хімічного травлення використовували 4%-ий спиртовий розчин азотної кислоти.

Хімічний склад неметалевих включень досліджували на установці рентгеноспектрального мікроаналізу «CAMECA» і растровому електронному мікроскопі «SUPRA 40 WDS» виробництва Carl Zeiss (Німеччина). Похибка вимірювань складає не більше 1 %.

Металографічні дослідження зразків металу проводили за допомогою світлових мікроскопів типу МІМ-8 і МІН-8.

Результати дослідження. Для отримання наочної картини щодо розподілу сірки за перетином зразків, що наплавляються, були підготовлені макрошліфи, за допомогою яких проводилася оцінка якості металу за кількістю, розміром, формою і розподілом сірчаних включень на відбитку за Бауманом.

Аналіз сірчаних відбитків макрошліфів (рис. 2) показав, що незважаючи на значний вміст сірки, відбувається інтенсивне рафінування металу. При виготовленні сірчаних відбитків на макрошліфах сталі 12Х13 не з'явилися відбитки сірки, незважаючи на великий її вміст. Це пов'язано з тим, що сірка знаходиться в сульфідах хрому, і вони не вступили в реакцію із сірчаною кислотою [22, 23].

При металографічному дослідженні шліфів зі сталі 12Х13 неметалевих включень в зоні сплавлення не виявлено. Аналіз макроструктури сталі 20 показав на

значну кількість неметалевих включень, що обумовлено високим вмістом сірки в металі.

Метал основи сталі 20 до наплавлення має грубі неметалеві включення (сульфіди, окисульфід) з розміром від 15 до 75 мкм, переважна кількість включень має розмір 50—75 мкм, а інколи зустрічалися включення і розміром до 90 мкм.

Визначено, що форма і розмір неметалевих включень характерні для литого металу. За мірою наближення до зони сплавлення вони подрібнюються, і їх кількість зменшується. На відстані 8—12 мм від зони сплавлення неметалеві включення мають правильну глобулярну форму (рис. 3). На ділянці, в якій метал знаходився в рідкотвердому стані, в результаті проходження дифузійних процесів, сірка перейшла в шлак.

Сульфідні в металі основи представлені переважно сульфідами марганцю і заліза (табл. 1, спектри 2, 3). Хімічний склад характерних включень у сталі 20 представлено на рис. 4. Як видно з рис. 4, у включеннях також присутні марганець і алюміній, а в матриці є лише їх залишки. Можливо, цьому сприяла висока температура металу під час наплавлення.

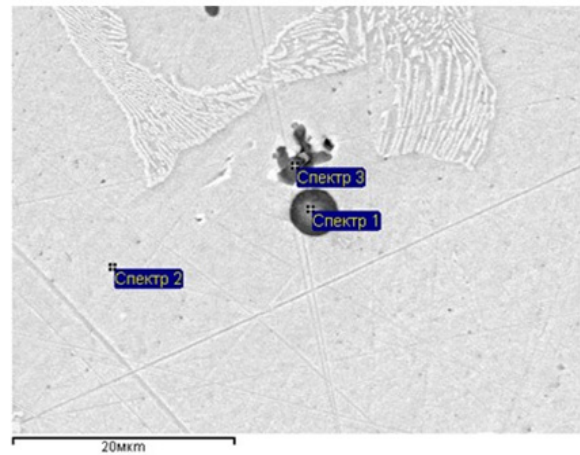


Рис. 3. Неметалеві включення поблизу зони сплавлення в металі основи сталі 20

Аналіз даних рис. 5 показав, що в процесі наплавлення сталі 12Х13 на сталь 20 підвищення вмісту хрому відбувається плавно на протязі 0,1 мм. Загалом увесь метал основи має велику кількість пор (рис. 5). На рис. 6 представлено зону сплавлення зі складом неметалевих включень: як в сталі 20, так і в сталі 12Х13 присутні сульфідні хрому і заліза. Визначено, що в зоні сплавлення неметалеві включення містять O, Al, Si, S, Ca, Cr, Mn (табл. 2), що пов'язано з інтенсивним перемішуванням металів під час розводки і при подальшому процесі наплавлення (рис. 6). Наявність в неметалевих включеннях заліза можна пояснити тим, що включення мають розмір близько 1 мкм, в той час як промінь аналізатора має діаметр близько 5—6 мкм і, звісно, він охоплює й метал поблизу включення.

Типові неметалеві включення в металі, що наплавляється, зі сталі 12Х13 поблизу зони сплавлення представлено на рис. 7. Встановлено, що неметалеві включення багатокомпонентні та мають



Рис. 2. Сірчані відбитки макрошліфів: а — на сталь 20 наплавлене сталь 20; б — на сталь 20 наплавлене сталь 12Х13; в — на сталь 12Х13 наплавлене сталь 12Х13; г — на сталь 12Х13 наплавлене сталь 20

Хімічний склад неметалевих вкраплень в металі основи зі сталі 20

Спектр	В статистиці	Вміст елементів, % ваговий					Всього, % ваговий
		O	Al	S	Mn	Fe	
Спектр 1	Так	51,37	46,83	—	—	1,79	100,00
Спектр 2 (матриця)	Так	—	2,95	6,60	10,13	80,32	100,00
Спектр 3	Так	28,91	41,08	2,49	3,76	23,75	100,00
Максимальний	—	51,37	46,83	6,60	10,13	80,32	—
Мінімальний	—	28,91	2,95	2,49	3,76	1,79	—

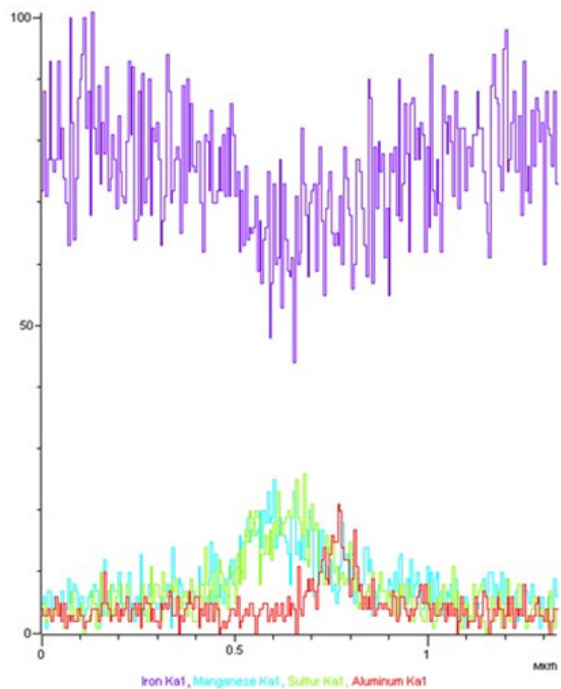
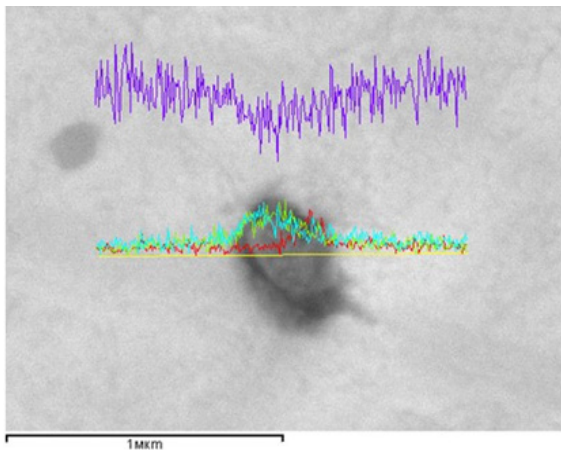


Рис. 4. Склад типового неметалевого вкраплення (сульфіду марганцю) у сталі 20

у своєму складі значну кількість наступних елементів: O, Al, Cr, Mn, S (табл. 3). Хімічний склад характерних сульфідів в зоні сплавлення представлено на рис. 8. Встановлено, що їх кількість незначна і розмір не перевищує 1 мкм. Встановлено, що за допомогою світлового мікроскопа класифікувати неметалеві вкраплення таких розмірів практично неможливо.

По мірі віддалення від зони сплавлення кількість неметалевих вкраплень збільшується, їх розмір не

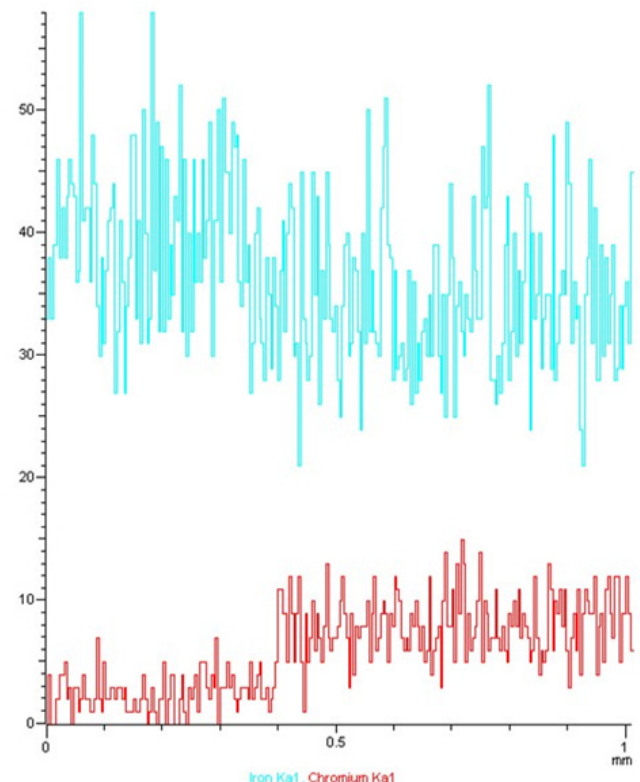
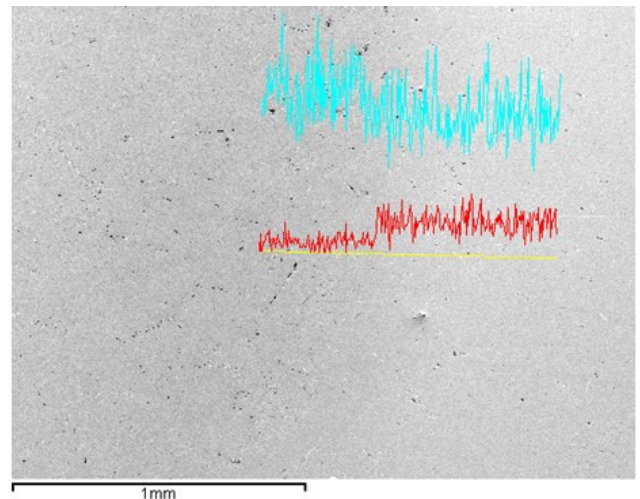


Рис. 5. Розподіл хрому в зоні сплавлення (наплавлення сталі 12X13 на сталь 20)

перевищує 1—2 мкм (рис. 9). В місцях заміру спектра склад характерних неметалевих вкраплень (сульфіди хрому і марганцю) представлено в табл. 4, що відповідно відображено в режимі картування (рис. 10).

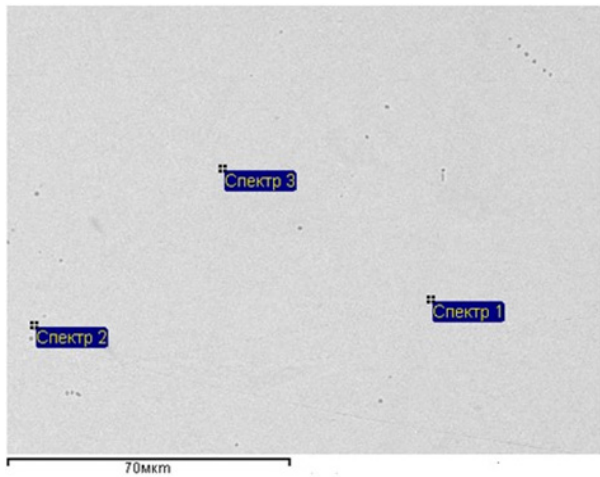


Рис. 6. Характерні неметалеві вкраплення в зоні сплавлення

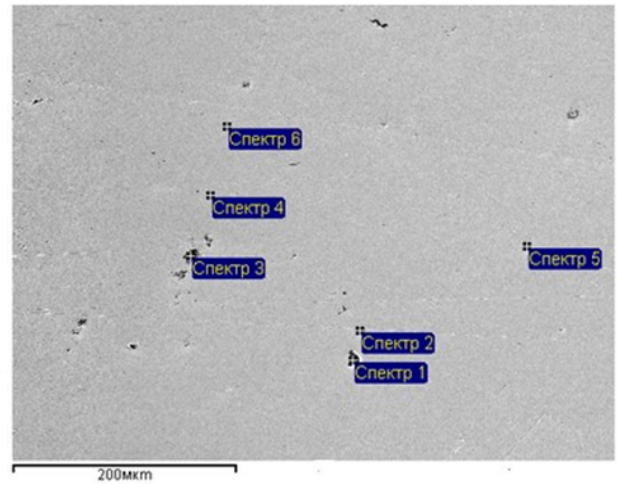


Рис. 7. Склад типових неметалевих вкраплень біля зони сплавлення в наплавленому металі зі сталі 12Х13

Таблиця 2

Хімічний склад неметалевих вкраплень в зоні сплавлення

Спектр	В статистиці	Вміст елементів, % ваговий				Всього, % ваговий
		S	Cr	Mn	Fe	
Спектр 1	Так	26,64	38,63	2,10	32,63	100,00
Спектр 2	Так	1,63	12,38	—	85,98	100,00
Спектр 3 (матриця)	Так	—	12,14	—	87,86	100,00
Максимальний	—	26,64	38,63	2,10	87,86	—
Мінімальний	—	1,63	12,14	2,10	32,63	—

Таблиця 3

Хімічний склад неметалевих вкраплень в сталі 12Х13

Спектр	Вміст елементів, % ваговий								Всього, % ваговий
	O	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	
Спектр 1	29,67	1,57	1,76	4,46	1,47	28,21	—	32,86	100,00
Спектр 2	19,61	17,81	—	13,02	1,07	15,27	5,54	27,68	100,00
Спектр 3	41,37	34,08	0,80	1,33	—	2,57	—	19,85	100,00
Спектр 4	29,77	26,37	—	3,46	—	5,42	1,16	33,83	100,00
Спектр 5	—	2,02	—	27,54	—	35,37	—	35,07	100,00
Спектр 6 (матриця)	—	—	—	—	—	8,22	—	91,78	100,00
Максимальний	41,37	34,08	1,76	27,54	1,47	35,37	5,54	91,78	—
Мінімальний	19,61	1,57	0,80	1,33	1,07	2,57	1,16	19,85	—

Таблиця 4

Хімічний склад неметалевих вкраплень в спектрах випромінювання в сталі 12Х13

Спектр	В статистиці	Вміст елементів, % ваговий					Всього, % ваговий
		Si	S	Cr	Mn	Fe	
Спектр 1	Так	—	14,80	24,94	—	60,26	100,00
Спектр 2	Так	—	21,16	31,72	3,51	43,61	100,00
Спектр 3 (матриця)	Так	—	—	12,31	—	87,69	100,00
Сумарний спектр	Так	0,50	2,83	13,22	—	78,75	100,00
Максимальний	—	0,50	21,16	31,72	3,51	87,69	—
Мінімальний	—	0,50	2,83	12,31	3,51	43,61	—

Направлена кристалізація і велика площа контакту металу з рідким шлаком сприяє утворенню неметалевих вкраплень розміром 1 мкм, що обумовлює підвищення механічних властивостей металу, що наплавляється. Вкраплення в металі, що наплавляється, представлені сульфідами хрому і марганцю (рис. 11). Вони мають переважно глобулярну форму і рівномірно розподілені за об'ємом металу, що наплавляється.

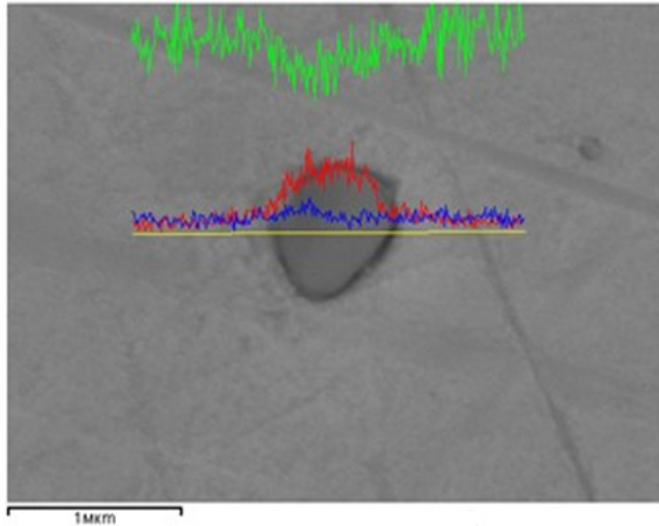


Рис. 8. Розподіл елементів у сульфіді (зона сплавлення)

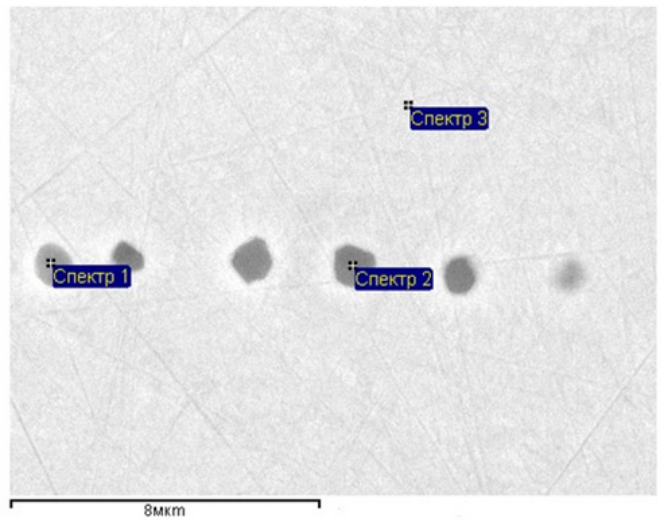


Рис. 9. Характерні неметалеві вкраплення в наплавлений сталі 12X13

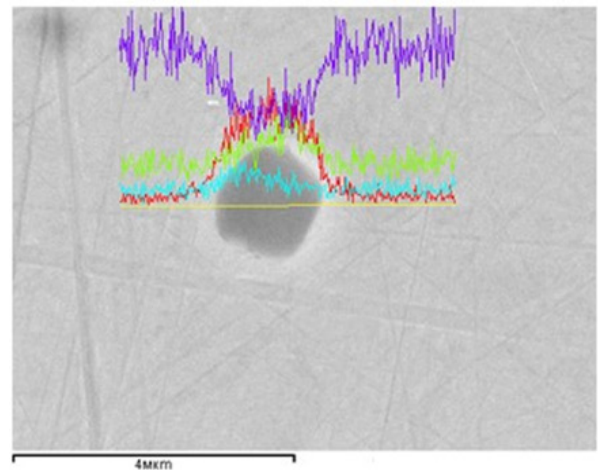
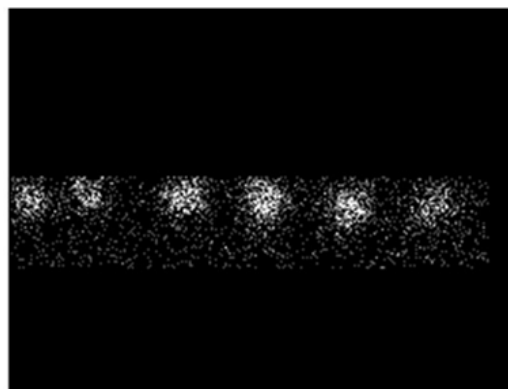
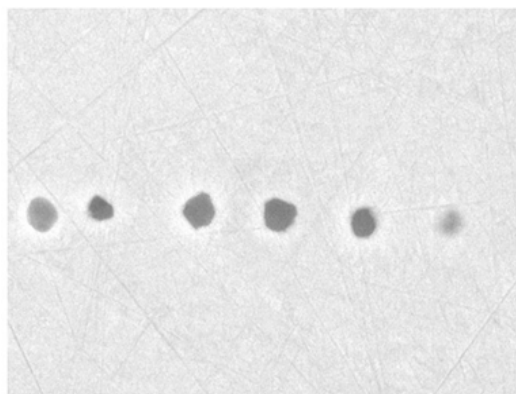
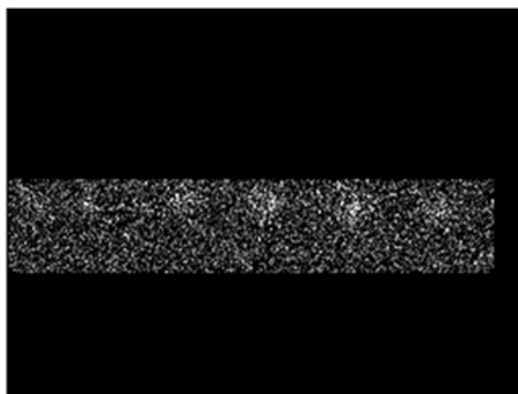


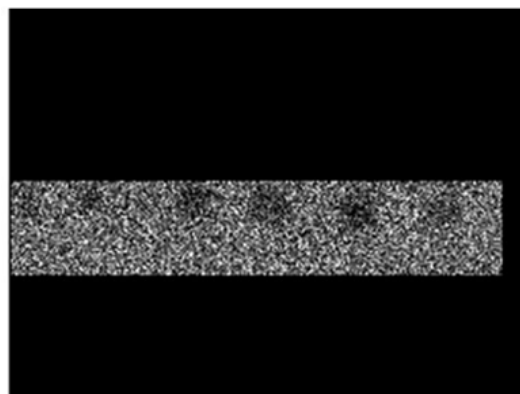
Рис. 11. Розподіл елементів у сульфіді хрому (сталі 12X13)



S Ka1



Cr Ka1



Fe Ka1

Рис. 10.

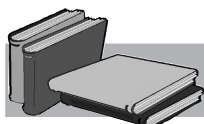
Хімічний склад неметалевих вкраплень у режимі картування

Висновки та перспективи досліджень

1. Проведені дослідження при електрошлаковому наплавленні сталей з великою кількістю сірки дозволили встановити, що кількість сірки в металі при наплавленні не впливає на чистоту зони сплавлення за вмістом неметалевих вкраплень.

2. Інтенсивне очищення зони сплавлення і перших порцій металу, що наплавляється, відбувається завдяки великій поверхні реагування з високоактивним рідким фторидним флюсом і високій температурі шлакової ванни. В результаті протікання цих процесів неметалеві вкраплення подрібнюються, зменшується їх кількість, і вони рівномірно розподіляються за об'ємом металу.

3. Неметалеві вкраплення в зоні сплавлення мають сприятливу глобулярну форму, дрібні за розміром і рівномірно розподілені за об'ємом металу, що сприяє збільшенню рівня механічних властивостей сталей, тому що їх розмір не перевищує розміру так званих «критичних» вкраплень.

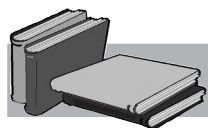


ЛІТЕРАТУРА

1. Zhongli Liu, Xihai Liu, Chuanhao Yang. The application of ESR technology for nuclear power equipments in China. MMS-100. Proceedings Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7—10 June 2016. P. 28—31.
2. Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., Рябцев И.А., Сарычев И.С. Электрошлаковая наплавка. Москва: Наука и технология, 2001. 180 с.
3. Tezuka M., Yamamoto S., Takahashi F. et al. Internal quality of 2150 mm-diameter ingot manufactured using new 150-ton ESR furnace. Proceedings of the 19th International Forgemasters Meeting (IFM2014) (29 September—2 October 2014, Tokyo). Tokyo, 2014. P. 90—94.
4. Kubin M., Scheriau A., Knabl M., Holzgruber H., Kawakami H. Operational experience of large sized ESR plants and attainable quality of ESR ingots with diameter of up to 2600 mm. Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting (LMPC2013) (22—25 September 2013, Austin (Texas)). P. 57—64. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48102-9_8

5. Turpin, B., Danks D., Callaghan I., Wood W. Narrow Gap Electroslag Is Process of Choice for Welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding Journal*. 2012. Vol. 9. No. 5. P. 24—31.
6. Janice J. Chambers, Brett R. Manning. Electroslag Welding: From Shop to Field. *STRUCTURE magazine*. 2016. P. 20—23. URL: <https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2016/01/C-BuildingBlocks-Chambers-Feb161.pdf> (дата звернення: 06.04.2024).
7. Медовар Л.Б., Полішко Г.О., Петренко В.Л., Стовпченко Г.П. Сучасні електрошлакові технології переплаву електроду та переробка рідкого металу (огляд). *Теорія і практика металургії*. 2020. № 2. С. 17—25. <https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03>
8. Kitani Y., Ikeda R., Ono M., Ikeuchi K. Improvement of Weld Metal Toughness in High Heat Input Electro-Slag Welding of Low Carbon Steel. *Welding in the World*. 2009. Vol. 53. P. 57—63. <https://doi.org/10.1007/BF03266704>
9. Воденнікова О.С., Воденнікова Л.В. Десульфуратія сталі: сучасні технології, тенденції та перспективи. *Метал та луття України*. 2022. Т. 30. № 1(328). С. 42—53. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.042>
10. Воденнікова О.С., Головков П.В. Сучасний досвід десульфуратії сталі. *Науково-технічний журнал «Матеріалознавство та обробка металів»*. 2021. Т. 27. № 4. С. 33—44. <https://doi.org/10.15407/mom2021.04.033>
11. Andre Costa e Silva. Non-metallic inclusions in steels — origin and control. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 3. P. 283—299. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.003>
12. Парахневич Е.Н. Механизм десульфурации при электрошлаковой наплавке. *Теория и практика металлургии*. 2013. № 1—2. С. 21—24.
13. Парахневич Є.М., Луньов В.В. Фізико-механічні властивості металу в зоні сплавлення при електрошлаковому наплавленні на Ст3 сталі 20ХН3А. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 5. С. 25—27.
14. Bettoni P., Biebricher U., Franz H., Lissignoli A., Paderni A., Scholz H. Large ESR forging ingots and their quality in production. *La Metallurgia Italiana*. 2014. No. 106(10). P. 13—21.
15. Wang C., Song J. Structure modification and constant remelting speed control of a 120-t three-phase electroslag furnace. *China Foundry*. 2012. Vol. 9. No. 4. P. 370—375.
16. Skidin I., Vodennikova O., Vodennikov S., Saithareiev L., Telkov S. Parameter analysis of non-metallic inclusion formation in thermite alloys. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021). 2021. Vol. 280. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128007015>
17. Kiessling R., Lange N. Non-metallic Inclusions in Steel. Parts I–IV. London: The Institute of Metals, 1978. 465 p.
18. Kiessling R., Pickering F.B. Non-metallic Inclusions in Steel. Part V. London: The Institute of Metals, 1989. 208 p.
19. Парахневич Є.М., Сперанський Б.С., Петруша Ю.П. Якісні показники властивостей металу деталей, відновлених електрошлаковим методом. Неметалеві вкращення і гази у ливарних сплавах: збірник тез IX міжн. наук.-техн. конф. (18—22 вересня 2000 р.). Запоріжжя: ЗДТУ, 2018. С. 35—36.
20. Парахневич Є.М., Петруша Ю.П., Луньов В.В. Особливості технології відновлення деталей електрошлаковим методом. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2003. № 1. С. 60—62.
21. Парахневич Е.Н., Петруша Ю.П., Лунев В.В. и др. Методика выявления зоны сплавления при электрошлаковой наплавке. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2007. № 5. С. 66—68.
22. Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. Москва: Химия, 1975. 816 с.
23. Середа Б.П., Кругляк І.В., Гайдаенко О.С., Нестеренко С.В., Банніков Л.П., Середа Д.Б. Дослідження корозійної стійкості конструкційних матеріалів, працюючих в умовах сульфатних розчинів коксохімічного виробництва. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2019. Т. 1. № 34. С. 54—59. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.34.2019.11>

Надійшла 17.04.2024



REFERENCES

1. Zhongli, Liu, Xihai, Liu, Chuanhao, Yang (2016). The application of ESR technology for nuclear power equipments in China. MMS-100: Proceedings Medovar Memorial Symposium. Kyiv, Ukraine, 7-10 June 2016, pp. 28-31.
2. Kuskov, Yu.M., Skorokhodov, V.N., Ryabtsev, I.A., Sarychev, I.S. (2001). Electroslag coating. Moscow: Science and Technology, 180 p. [in Russian].
3. Tezuka, M., Yamamoto, S., Takahashi, F. et al. (2014). Internal quality of 2150 mm-diameter ingot manufactured using new 150-ton ESR furnace. Proceedings of the 19th International Forgemasters Meeting (IFM2014) (29 September-2 October 2014, Tokyo), Tokyo, pp. 90-94.
4. Kubin, M., Scheriau, A., Knabl, M., Holzgruber, H., Kawakami, H. (2013). Operational experience of large sized ESR plants and attainable quality of ESR ingots with diameter of up to 2600 mm. Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting (LMPC2013) (22-25 September 2013, Austin (Texas), pp. 57-64. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48102-9_8

5. Turpin, B., Danks, D., Callaghan, I., Wood, W. (2012). Narrow Gap Electroslag Is Process of Choice for Welding San FranciscoOakland Bay Bridge. *Welding Journal*, 9(5), 24-31.
6. Janice J. Chambers, Brett R. Manning (2016). Electroslag Welding: From Shop to Field. *STRUCTURE magazine*, 20–23. URL: <https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2016/01/C-BuildingBlocks-Chambers-Feb161.pdf> (Last accessed: 06.04.2024).
7. Medovar, L.B., Polishko, G.O., Petrenko, V.L., Stovpchenko, G.P. (2020). Modern electroslag technologies of electrode remelting and processing of liquid metal (review). *Theory and practice of metallurgy*, 2, 17-25. <https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03> [in Ukrainian].
8. Kitani, Y., Ikeda, R., Ono, M., Ikeuchi, K. (2009). Improvement of Weld Metal Toughness in High Heat Input Electro-Slag Welding of Low Carbon Steel. *Welding in the World*, 53, 57-63. <https://doi.org/10.1007/BF03266704>
9. Vodennikova, O.S., Vodennikova, L.V. (2022). Desulfurization of steel: modern technologies, trends and prospects. *Metal and Casting of Ukraine*, 30(1(328)), 42-53. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.042> [in Ukrainian].
10. Vodennikova, O.S., Holovkov, P.V. (2021). Modern view on steel desulfurization. *Scientific Technical Journal Metal Science and Treatment of Metals*, 27(4), 33-44. <https://doi.org/10.15407/mom2021.04.033> [in Ukrainian].
11. Andre Costa e Silva (2018). Non-metallic inclusions in steels — origin and control. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(3), 283-299. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.003>
12. Parahnevich, E.M. (2013). The mechanism of desulfurization during electroslag surfacing. *Theory and practice of metallurgy*, 1-2, 21-24 [in Russian].
13. Parahnevich, E.M., Lunyov, V.V. (2012). Physico-mechanical properties of the metal in the fusion zone during electroslag surfacing on St3 steel 20XH3A. *Metallurgical and Mining Industry*, 5, 25-27 [in Ukrainian].
14. Bettoni, P., Biebricher, U., Franz, H., Lissignoli, A., Paderni, A., Scholz, H. (2014). Large ESR forging ingots and their quality in production. *La Metallurgia Italiana*, 106(10), 13-21.
15. Wang C., Song, J. (2012). Structure modification and constant remelting speed control of a 120-t three-phase electroslag furnace. *China Foundry*, 9(4), 370-375.
16. Skidin, I., Vodennikova, O., Vodennikov, S., Saithareiev, L., Telkov, S. (2021). Parameter analysis of non-metallic inclusion formation in thermite alloys. *Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021)*, vol. 280. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128007015>
17. Kiessling, R., Lange, N. (1978). Non-metallic Inclusions in Steel. Parts I–IV. London: The Institute of Metals, 465 p.
18. Kiessling, R., Pickering, F.B. (1989). Non-metallic Inclusions in Steel. Part V. London: The Institute of Metals, 208 p.
19. Parahnevich, Ye.M., Speransky, B.S., Petrusha, Yu.P. (2000). Qualitative indicators of metal properties of parts restored by the electroslag method. Non-metallic inclusions and gases in foundry alloys: a collection of theses of the 1st International science and technology conference (September 18-22, 2000). Zaporizhzhia: ZDTU, pp. 35-36 [in Ukrainian].
20. Parahnevich, Ye.M., Petrusha, Yu.P., Lunyov, V.V. (2003). Features of the technology of restoration of parts by the electroslag method. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 1, 60-62 [in Ukrainian].
21. Parahnevich, E.N. Petrusha, Yu.P., Lunev, V.V. et al. (2007). The method of identifying the fusion zone during electroslag surfacing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 66-68 [in Russian].
22. Vorobeva, G.Ya. (1975). Corrosion resistance of materials in aggressive environments of chemical production. Moscow: Khimiya, 816 p. [in Russian].
23. Sereda, B.P., Kruglyak, I.V., Gaydaenko, A.S., Nesterenko, S.V., Bannikov, L.P., Sereda, D.B. (2019). Study of the corrosion resistance of structural materials working in conditions of sulphate solutions of coke chemical production. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 1, 34, 54-59. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.34.2019.11> [in Ukrainian].

Received 17.04.2023

Summary

Ye.M. Parahnevich¹, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor, e-mail: g1028913@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6674-5609>

Ye.I. Ivakhnenko¹, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor, e-mail: ivakhnenko.ie.zp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0210-2575>

Yu.P. Petrusha¹, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor, e-mail: verba2204@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7359-4757>

V.V. Kudin¹, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor, e-mail: vadim.kudin1973@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8553-6685>

O.S. Vodennikova², PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor, e-mail: oksana_vodennikova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0496-5435>

¹Zaporizhzhia Polytechnic National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

²Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

Features of the distribution of non-metallic inclusions during electroslag surfacing with a high sulfur content

Today, the question of the quality of parts is quite acute in mechanical engineering. As a rule, most parts are made from castings obtained by various methods. The main task facing the foundry industry in our country is to significantly improve the overall quality of castings, which is expressed in reducing the thickness of the walls, reducing the allowances for mechanical processing and for pouring and feeding systems while maintaining the necessary operational properties of the products. The final result of this work should be to provide the increased needs of mechanical engineering with the required number of cast blanks without a significant increase in the total production of castings by mass. The high operational characteristics of castings depend significantly on the purity of the alloys in terms of the content of harmful impurities and non-metallic inclusions. Sulfur is a very harmful impurity for steel, which, even in small amounts, significantly reduces its mechanical properties. This is especially relevant for parts that work in difficult working conditions (variable loads, high temperature, etc.).

This article presents the results of the study of the distribution of non-metallic inclusions and sulfur in the fusion zone, the transition zone and the base metal during electroslag welding of chemically heterogeneous steels with a high sulfur content. It is shown that the amount of sulfur in the metal, even at high concentrations, does not affect the purity of the fusion zone in terms of the content of non-metallic inclusions. Intensive cleaning of the fusion zone and the first portions of the deposited metal occurs due to the large reaction surface with the highly active liquid fluoride flux and the high temperature of the slag bath. As a result of these processes, non-metallic inclusions are crushed, their number decreases and they are evenly distributed throughout the volume of the metal. Accordingly, non-metallic inclusions in the fusion zone have a favorable globular shape, they are small in size and evenly distributed in the volume of the metal, which helps to increase the level of mechanical properties of steels, because their size does not exceed the so-called "critical" sizes of inclusions.

Keywords

Electroslag surfacing, crystallizer, non-metallic inclusions, sulfide, structure, fusion zone.