

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ AISI 304 ПІД РІЗНИМИ ФЛЮСАМИ

М.М. Ямшинський<sup>1</sup>, М.С. Лавренюк<sup>1</sup>, Д.І. Трикозенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: [yamshinskiy@ukr.net](mailto:yamshinskiy@ukr.net)

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [dan2002@ukr.net](mailto:dan2002@ukr.net)

Розглянуто процес електрошлакового переплаву нержавіючої сталі AISI 304 під чотирма різними флюсами. Визначено продуктивність переплаву витратного електрода для кожного флюсу за однакової прикладеної потужності. Досліджено зміну хімічного складу шлаку після переплаву витратних електродів та розмір і кількість неметалевих включень в металі зливок після ЕШП під флюсами різного хімічного складу. Встановлено, що застосування різних флюсів суттєво впливає на якість отриманих зливок. Рекомендовано найкращий флюс серед досліджених для здійснення ЕШП нержавіючої сталі AISI 304. Найкращі показники щодо збереженого хімічного складу сталі та кількості неметалевих включень в ній досягнуто у зливку, отриманому після ЕШП під флюсом АНФ-7. Він мав найнижчий індекс забрудненості неметалевими включеннями та найменшу кількість оксидів металу в шлаці після переплаву. Метал зливка, отриманого після ЕШП під флюсом АНФ-1, показав гарні результати за індексом забрудненості неметалевими включеннями. Проте переплав під цим флюсом найбільше вплинув на вміст Si та Mn в металі. Бібліогр. 8, табл. 5, рис. 3.

*Ключові слова:* електрошлаковий переплав, витратний електрод, нержавіюча сталь, шлак, флюс, коефіцієнт заповнення, продуктивність переплаву, неметалеві включення, хімічний склад, зливка

**Вступ.** Електрошлаковий переплав є основним способом виготовлення високоякісних нержавіючих сталей, які використовуються в авіації, енергетиці, медицині та інших сферах. У процесі переплаву метал очищається від неметалевих включень, газів та сірки завдяки хімічним реакціям зі шлаком. Крім того, шлак захищає розплавлений метал від контакту з атмосферою, попереджаючи окислення. Краплі металу, проходячи крізь шлакову ванну, потрапляють у кристалізатор, що охолоджується водою, і формують металеву ванну. У кристалізаторі рідкий метал поступово кристалізується, утворюючи зливку із направленою кристалічною структурою. Між кристалізатором і зливком утворюється тверда кірка шлаку, яка забезпечує формування якісної поверхні зливка [1]. Електрошлаковий переплав (ЕШП) забезпечує помітне покращення характеристик матеріалів шляхом вирішення питань чистоти структури з достатньою економічною ефективністю. Однією з ключових переваг є видалення неметалевих включень і газів. Шлакова ванна, що переважно складається з  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{CaF}_2$ , виконує роль рафінувального середовища, зменшуючи в металі вміст і розмір включень, а також сірки, що є критичним для металургійної якості зливка [2, 3].

ЕШП вимагає точного регулювання параметрів, таких як склад шлаку, прикладена потужність та швидкість плавлення. Зміни в складі шлаку, наприклад, через втрату летких компонентів або

реакції з електродом, можуть негативно вплинути на якість зливка. Для нержавіючих сталей, які містять легуючі елементи, це може призвести до нерівномірного розподілу або втрати цих елементів, що знижують корозійну стійкість [4].

Практика ЕШП високолегованих сталей має тривалу історію успішного застосування в металургії спеціальних і відповідальних конструкційних матеріалів. Цей процес широко використовується для виготовлення зливок із покращеними характеристиками чистоти, однорідності структури та механічних властивостей, особливо в аерокосмічній, енергетичній та оборонній галузях. Відомо, що саме ЕШП дозволяє суттєво знизити вміст неметалевих включень, вирівняти розподіл легувальних елементів у зливку та отримати щільну структуру металу, що забезпечує високі експлуатаційні характеристики матеріалу [5–7].

Однак ефективність процесу ЕШП значною мірою залежить від хімічного складу та фізико-хімічних властивостей флюсу, який виконує функції електропровідного середовища та багатьох інших параметрів. Тому дослідження впливу різних флюсів на перебіг процесу плавлення, термодинамічну рівновагу між шлаком і металом, а також на мікроструктурні та якісні характеристики отриманих зливок є надзвичайно актуальними.

Зважаючи на викладене, доцільним є проведення системного дослідження флюсів з варіативним вмістом оксидів кальцію, алюмінію, кремнію, фто-

М.М. Ямшинський — <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>, Д.І. Трикозенко — <https://orcid.org/0009-0008-7858-7581>

Таблиця 1. Хімічний склад сталі за стандартом AISI 304/EN 1.4301, %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
до 0,07	до 0,75	до 2	до 0,04	до 0,03	18...19	8...10	Основа

ридів та інших компонентів, які можуть впливати на температуру плавлення, в'язкість та розчинність домішок. Таке дослідження дозволить не лише оптимізувати флюси під конкретні марки сталей, а й забезпечити цілеспрямоване керування процесами рафінування та кристалізації при ЕШП, що є запорукою отримання металу високої якості.

**Постановка задачі дослідження.** Метою даної роботи є встановлення впливу складу флюсів на режим переплаву та хімічний склад зливків нержавіючої сталі AISI 304, отриманих способом електрошлакового переплаву. Дослідити зміну хімічного складу як шлаку, так і металу та визначити зміни неметалевих включень в між вхідним металом витратного електрода та металу зливків.

**Методика досліджень.** Плавку здійснювали у водоохолоджуваному кристалізаторі на лабораторній печі електрошлакового переплаву УШ-114.

Джерелом живлення УШ-114 є зварювальний трансформатор змінного струму з падаючою характеристикою та загальною потужністю 90 кВА (60 В, 1500 А).

Для дослідження використовували електроди марки AISI 304 (табл. 1) діаметром 30 мм і довжиною 450 мм. Коефіцієнт заповнення кристалізатора при цьому складає 0,36.

Висота внутрішньої порожнини водоохолоджуваного кристалізатора, що визначає максимально можливу висоту зливка, складає 200 мм. Діаметр внутрішньої порожнини у основи становить 55, на вершині 50 мм.

Для порівняльної оцінки ефективності впливу різних флюсів на перебіг переплаву та якість отриманого металу було відібрано чотири різні флюси, що є типовими для електрошлакового переплаву конструкційних і нержавіючих сталей: АНФ-1, АНФ-7, АНФ-28 та експериментальний флюс умовного позначення 3/3/3, хімічний склад яких наведено в табл. 2. Ці флюси відрізняються за хімічним складом, що дозволяє оцінити вплив основності та термохімічної активності шлаку

Таблиця 2. Усереднений хімічний склад флюсів, що використовували в експериментах, мас. %

Флюс	CaF <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO
АНФ-1	93	5	–	2	–
АНФ-7	73	25	–	2	–
АНФ-28	30	10	20	35	5
3/3/3	33	33	30	3	1

на кінетику плавлення, ступінь рафінування та структурні характеристики зливків.

Таким чином, вибрані флюси забезпечують репрезентативну вибірку для дослідження впливу шлакових систем на результати електрошлакового переплаву сталі типу AISI 304 у різних умовах. Кількість флюсу для кожної плавки становила 250 г. Така кількість обумовлена тим, що висота шлакової ванни має становити близько 40 мм і щоб її опору було достатньо для протікання ЕШП.

Дослідження хімічного складу металу, флюсів та шлаків виконували на рентгенофлуоресцентному аналізаторі «Xrf express analyzer inam expert 4l». Дослідження неметалевих включень на оптичному мікроскопі «Carl Zeiss» та скануючому електронному мікроскопі «Sem Tescan vega 3».

**Результати досліджень та їх обговорення.** В результаті проведених експериментів було отримано чотири зливки (рис. 1). Вони мають різну якість поверхні, що обумовлено різними властивостями шлаків.

Плавлення витратного електрода в кожному експерименті здійснювали з підтриманням стабільного електричного режиму. Оскільки кожен із застосованих флюсів має характерне електрофізичне середовище, зокрема, різне значення питомого електричного опору у розплавленому стані, це безпосередньо впливає на тепловий баланс системи та швидкість переплаву. Відомо, що електричний опір флюсу визначає величину тепловиділення в об'ємі шлакової ванни під час проходження струму, що, у свою чергу, формує температурні умови плавлення електрода та кристалізації металу.



Рис. 1. Зливки, отримані в результаті плавок під різними флюсами: а — АНФ-1; б — АНФ-7; в — АНФ-28; г — 3/3/3

Таблиця 3. Хімічний склад шлаків після переплаву, мас. %

Шлак	CaF <sub>2</sub> + CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
АНФ-1	89,93	–	3,54	0,89	2,38	1,89	1,37
АНФ-7	87,61	–	2,36	0,90	0,98	1,46	0,59
АНФ-28	66,01	18,66	8,46	2,58	2,20	1,78	0,31
3/3/3	64,70	26,07	3,20	1,06	1,86	2,37	0,74

З урахуванням цих параметрів було виконано розрахунок продуктивності процесу наплавлення зливка для кожного із чотирьох флюсів. Розрахунок здійснювали на основі експериментальних даних щодо часу повного переплаву електрода, маси отриманого зливка та фіксованих електротехнічних характеристик (струм та напруга), кг/год: АНФ-1 = 14,8; АНФ-7 = 17,3; АНФ-28 = 16,1; 3/3/3 = 27,3.

Отримані результати продемонстрували помітну залежність продуктивності процесу від складу флюсу. Зокрема, флюси з вищим електричним опором (наприклад 3/3/3) забезпечували вищу температуру шлакової ванни, що сприяло швидшому переплаву електрода, натомість флюси з нижчим опором (як-от АНФ-1) характеризувалися зниженою питомою продуктивністю.

Таким чином, виконаний розрахунок дозволив кількісно оцінити вплив фізико-хімічних властивостей флюсів на ефективність ЕШП, а також забезпечив підґрунтя для подальшої оптимізації параметрів процесу залежно від поставлених технологічних завдань.

З метою оцінки змін у складі флюсів в процесі ЕШП було проведено визначення їх хімічного складу після завершення процесу. Отримані результати наведено в табл. 3.

Варто зазначити, що аналіз проводився із використанням рентгенофлуоресцентного аналізатора, який дозволяє визначати вміст елементів лише у вигляді їх оксидних форм. У зв'язку з цим фториди, зокрема CaF<sub>2</sub>, не можуть бути точно ідентифіковані. Тому, у таблиці концентрація оксиду кальцію (CaO) представлена у сукупності з фторидами кальцію, тобто як умовна сумарна частка CaO + CaF<sub>2</sub>, яка в подальшому розглядається лише як оціночна величина загального вмісту кальцію в шлаковій фазі.

Такий підхід дозволяє здійснити порівняльний аналіз з урахуванням обмежень застосованого ме-

тоду, а також простежити тенденції зміни складу шлаку залежно від умов переплаву та ступеня участі компонентів у шлакометалевій взаємодії.

Оцінити вплив шлаку на хімічний склад металу можна за кількістю оксидів металів, таких як MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які спостерігаються в ньому після переплаву. Відсоток, що становлять відповідні оксиди металу після переплаву під різними флюсами складає, %: під АНФ-1 = 5,64; АНФ-7 = 3,03; АНФ-28 = 4,29; 3/3/3 = 4,97. Згідно цих даних можна стверджувати, що ЕШП під флюсом АНФ-7 найменше впливає на окислення металів під час переплаву досліджуваної сталі.

Хімічний склад металу після ЕШП представлено в табл. 4. Аналіз проводили із застосуванням методу рентгенофлуоресцентної спектроскопії, який забезпечує надійне визначення основних легувальних та супутніх елементів. Водночас, через обмеження методики, елементи, що входять до складу у вигляді легколетких або неметалевих сполук, зокрема вуглець, сірка та фосфор, не були визначені.

Однак їх концентрації у сталі типу AISI 304 є незначними та жорстко нормованими, тому відсутність даних щодо вмісту С, S та Р не впливає на репрезентативність поданої інформації та не змінює висновків щодо ефективності електрошлакового рафінування. Крім того відомо, що електрошлаковий переплав не змінює кількість вуглецю в розплаві металевій ванни. Таким чином, можна вважати, що отримані результати дозволяють провести коректну оцінку змін у складі основних легувальних компонентів та зробити висновки про рафінувальні властивості використаних флюсів.

Отримані дані свідчать про те, що всі зливки після ЕШП відповідають за хімічним складом стандарту AISI 304/EN 1.4301. З супутніх компонентів в цій сталі є Si та Mn, сильніше за всіх на них вплинув флюс АНФ-1, що свідчить про його високу реакційну здатність. Це підтверджується

Таблиця 4. Хімічний склад сталі AISI 304 після переплаву, мас. %

Флюс	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
АНФ-1	0,36	1,48	19	8	Основа
АНФ-7	0,66	1,66	18,16	8,05	—»—
АНФ-28	0,61	1,6	18,26	8,19	—»—
3/3/3	0,71	1,65	18,12	8,24	—»—

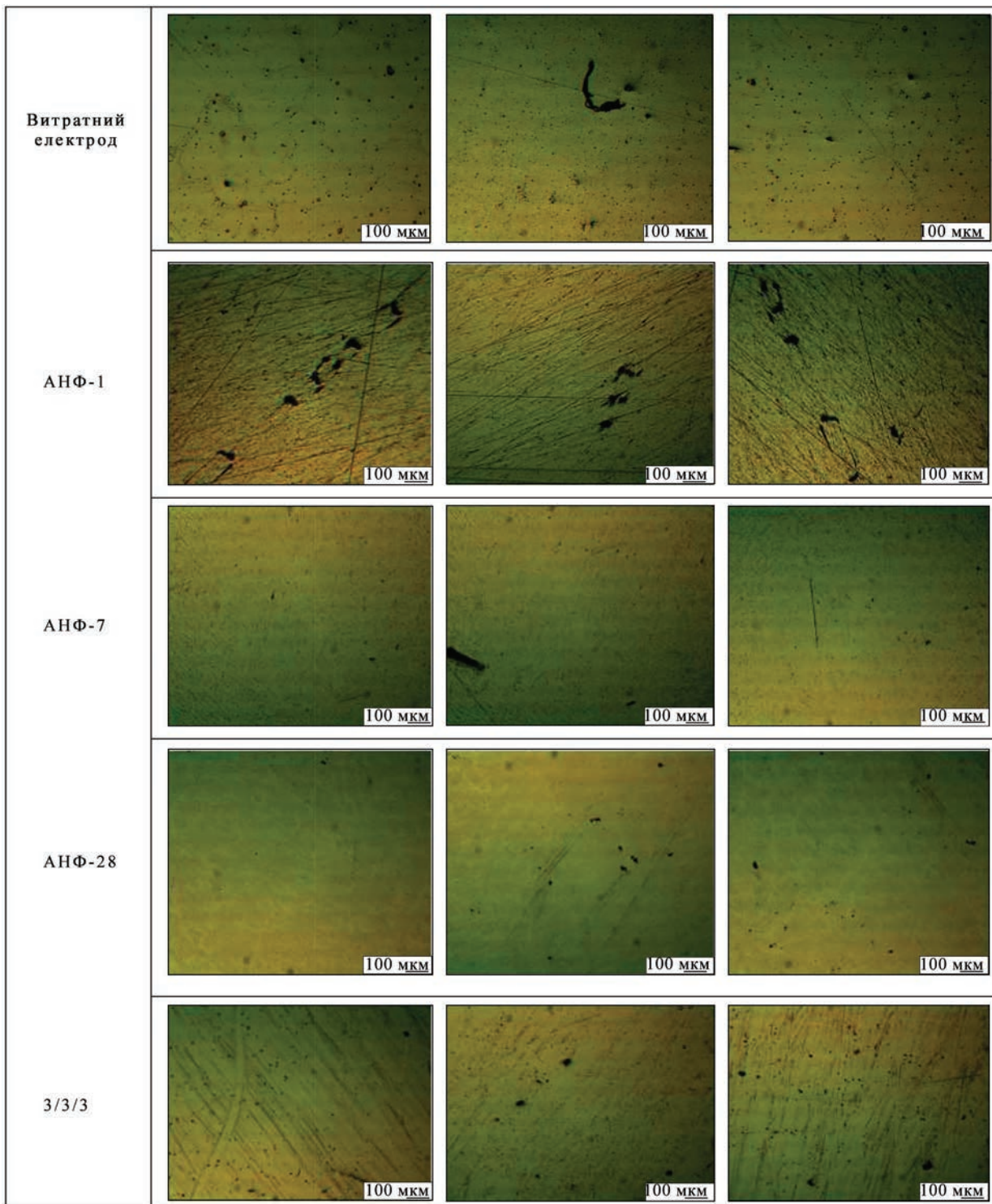


Рис. 2. Неметалеві включення в металі витратного електрода і зливоків, виплавлених під різними флюсами. Дослідження проводили в центральній, середній та зовнішній частинах зливка — відповідно ліва, центральна та права колонки

Таблиця 5. Загальний індекс забрудненості металу зразків

Марка флюсу									
АНФ-1	0,0032	0,0020	0,0020	0,0019	0,0004	0	0	0	0,0095
АНФ-7	—»—	0,0005	0,0009	0,003	—»—	—»—	—»—	—»—	0,008
АНФ-28	0,0059	0,0017	0,0016	0,0007	0,0008	—»—	—»—	—»—	0,01
3/3/3	0,0085	0,0029	0,0018	0,0011	0,0009	—»—	—»—	—»—	0,015
Вихідний зразок	0,01	0,0037	0,002	0,0016	0	0,0009	—»—	0,0009	0,0191

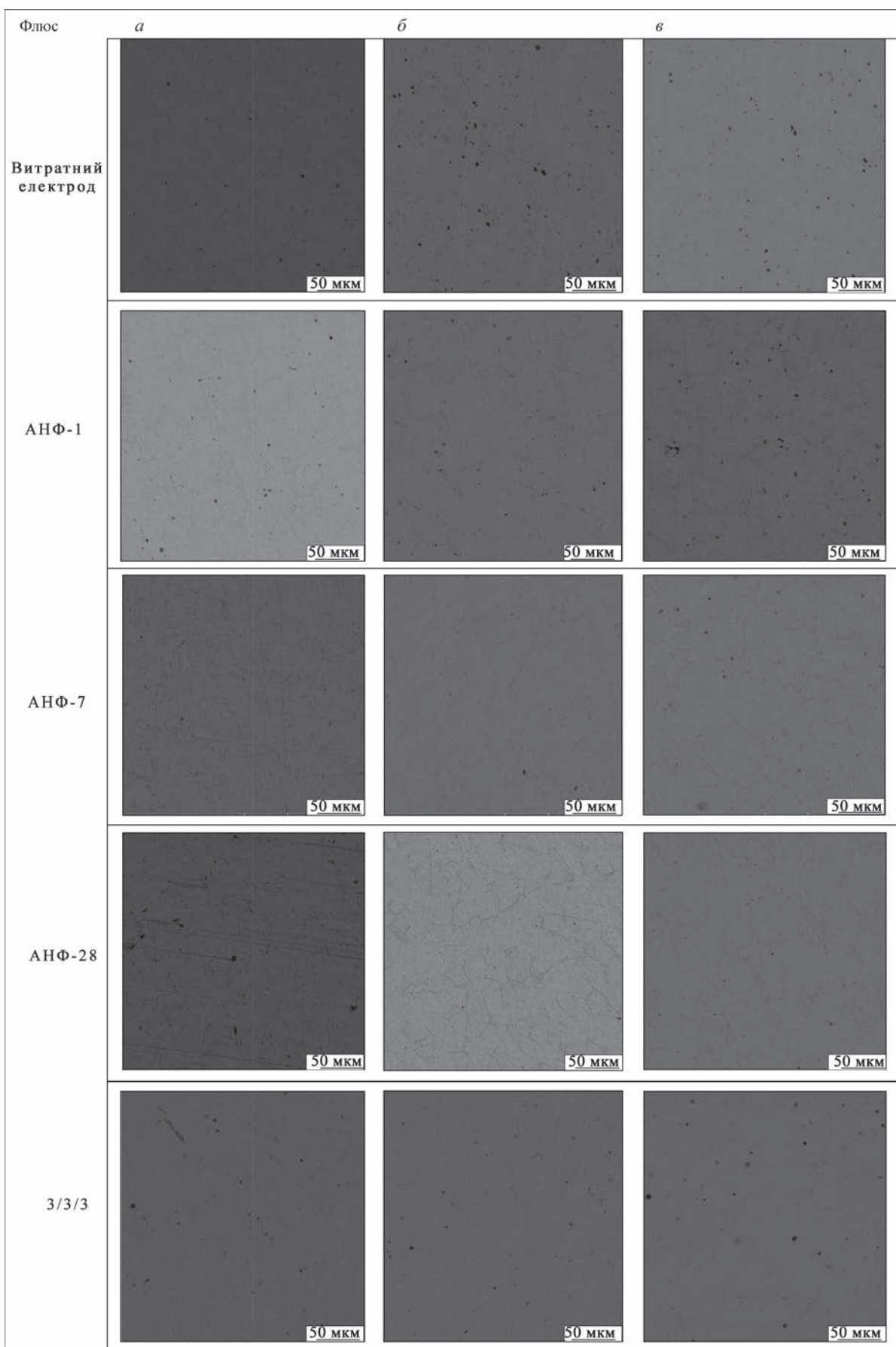


Рис. 3. Мікструктуру досліджуваних зразків проводили в центральній, середній та зовнішній частинах зливка — відповідно ліва, центральна та права колонки

наявністю в ньому найбільшої кількості оксидів металів, таких як  $MnO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , їх сума найбільша серед досліджуваних та складає для АНФ-1 = 5,64 %.

Вимірювання розмірів неметалевих включень вздовж горизонтальних та вертикальних ліній шліфів виконували згідно ДСТУ ISO 4967:2017 [8]. Відповідно до цього методу, визначення розмірів неметалевих включень для розрахунку індексу забрудненості для литих металів здійснювали методом лінійного підрахування на нетравлених шліфах.

Досліджувані зразки відбирали з центральної частини зливка та представлені на рис. 2.

З отриманого розрахунку індексу забрудненості неметалевими включеннями за методикою ДСТУ ISO 4967:2017 [8] було встановлено, що найнижчий загальний індекс забрудненості спостерігається у другого зразка (АНФ-7, табл. 5), що свідчить про найменшу кількість великих включень та високу чистоту металу. Найвищий загальний індекс забрудненості має вихідний метал. В ньому спостерігались включення розміром до 140 мкм, які мають значний вплив на якість металу. Найменший індекс забрудненості показав метал, переплавлений під флюсом АНФ-7.

Наступним етапом було дослідження мікроструктури дослідного металу за допомогою скануючого електронного мікроскопа (рис. 3).

У всіх трьох зонах видно рівномірну структуру із дрібними зернами. Центральна та середня частини мають однакову морфологію. Включення розподілені рівномірно. Характеризується дрібнозернистою структурою з відсутністю макропористості. На мікроструктурі зразків чітко видно різницю між центральною та периферійною зонами. У зразках, отриманих із флюсами АНФ-1 та АНФ-7, переважає дрібнозерниста структура з однорідним розподілом фаз.

Вихідний зразок до ЕШП був найгірший: велика кількість включень, мікротріщин, грубозерниста структура і найвищий індекс забрудненості.

Проведене дослідження підтверджує високу ефективність ЕШП як технології рафінування нержавіючих сталей, зокрема AISI 304. Застосування ЕШП дозволило досягти суттєвого покращення металургійної чистоти, зменшення кількості неметалевих включень, покращення макро- та мікроструктури металу, а також забезпечення рівномірного розподілу легувальних елементів за перерізом зливка. Результати випробувань підтверджують, що ЕШП сприяє стабілізації хімічного складу та зниженню впливу шкідливих домішок,

які погіршують корозійну стійкість і механічні властивості сталі.

Порівняльний аналіз ефективності чотирьох флюсів показав, що саме флюс АНФ-7 забезпечив оптимальний баланс між продуктивністю плавлення витратного електрода, рафінувальною здатністю шлаку і стабільністю електротехнічних параметрів та ефективним видаленням неметалевих включень. Також зафіксовано найкращі показники однорідності структури саме під час застосування флюсу АНФ-7.

З урахуванням отриманих результатів рекомендується використовувати флюс АНФ-7, як пріоритетний для електрошлакового переплаву сталей типу AISI 304, з метою підвищення якості металопродукції, зниження втрат легувальних елементів та забезпечення стабільного протікання технологічного процесу ЕШП.

## Висновки

В результаті проведених експериментів було встановлено, що застосування різних флюсів суттєво впливає на якість отриманих зливоків. Найкращі показники щодо хімічної чистоти та найменшої кількості неметалевих включень показав зразок зі зливка, отриманого ЕШП під флюсом АНФ-7. Він мав найнижчий індекс забрудненості та найменшу кількість оксидів металу в шлаці після переплаву. Зразок зі зливка, отриманого ЕШП під флюсом АНФ-1, показав схожі результати по індексу забрудненості неметалевими включеннями та найбільший вплив на вміст Si і Mn в металі.

## Список літератури/References

1. Paton, B.E., Lipinsky, V.A. (1973) *Electroslag remelting: Theory and practice*. Kyiv, Naukova Dumka.
2. Isaenko, V.P. (1992) *Technology of electroslag remelting of steels*. Kyiv, PWI.
3. Kurylo, P.Ya. (2007) *Electroslag remelting: Textbook*. Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House.
4. Novikov, I.I., Zhukov, V.I. (1983) *Metallurgy of welding production*. Moscow, Mashinostroenie.
5. Pedchenko, Ye., Kostetsky, Yu., Polishko, G. et al. (2023) Recycling of steel using the ESR method in the conditions of limited resources of raw materials to preserve the chemical composition and properties. In: *Proc. of Inter. Young Scientists Conf. on Modern Problems of Materials Science, 27–29 September, 2023, Lviv*. DOI: <https://doi.org/10.15407/msse2023.047>
6. Pedchenko, Ye.O., Kostetsky, Yu.V., Petrenko, V.L., Medovar, L.B. (2022) Recycling of used non-compact high-speed steel tools by electroslag remelting. *Suchasna Elektrometalyrhiya*, 3, 23–28 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.03>.
7. Pedchenko, Ye., Medovar, L., Kostetsky, Yu., Petrenko, V. (2022) Electroslag remelting as a method of recycling non-compact high-speed steel tools. In: *Proc. of 31<sup>st</sup> Inter.*

## INVESTIGATIONS OF ESR OF AISI 304 STAINLESS STEEL UNDER DIFFERENT FLUXES

M.M. Yamshynskiy<sup>1</sup>, M.S. Lavreniuk<sup>1</sup>, D.I. Trykozenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

37 Prospect Beresteyskiy, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: yamshinskiy@ukr.net

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: dan2002@ ukr.net

The process of electroslag remelting (ESR) of AISI 304 stainless steel under four different fluxes is considered. The remelting performance of the consumable electrode was determined for each flux at the same applied power. Changes in the slag chemical composition after consumable electrode remelting were analyzed. The size and quantity of non-metallic inclusions in the ingot metal after ESR under fluxes of different chemical compositions were investigated. It was established that choice of flux has a significant impact on the quality of the resulting ingots. The most effective flux among the studied compositions is recommended for ESR of AISI 304 stainless steel. The best indices of preservation of the steel chemical composition and the quantity of non-metallic inclusions in it were achieved in the ingot produced by ESR under ANF-7 flux. It had the lowest index of contamination by non-metallic inclusions and the smallest quantity of metal oxides in the slag after remelting. The metal of the ingot produced by ESR under ANF-1 flux also showed good results by the index of contamination by the non-metallic inclusions. However, remelting under this flux influenced Si and Mn content in the metal to the greatest extent. 8 Ref., 5 Tabl., 3 Fig.

*Keywords: electroslag remelting; consumable electrode, stainless steel, slag, flux, filling coefficient, remelting productivity, non-metallic inclusions, chemical composition, ingot*

Отримано 01.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 30.07.2025

Прийнято 07.08.2025



**РОЗРОБЛЕНО В ІЕЗ**

### РОБОТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС

для модифікації поверхні виробів широкого функціонального призначення  
із застосуванням плазмових, лазерних і гібридних технологій

Обробка прямою  
плазмовою дугою  
з магнітним управлінням

Плазмово-іскрове  
легування  
(мікронаплавлення)

Лазерно-плазмова  
модифікація + плазмово-  
іскрове легування

Лазерна модифікація  
і хіміко-термічна  
обробка

