УДК 669.117.56.002.6 https://doi.org/10.37434/sem2020.03.01

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ НОВОГО ШЛАКУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

Г.П. Стовпченко[1,2], С.В. Давидченко[3], Л.О. Лісова[1], Я.В. Гусєв[1], Л.Б. Медовар[1]

[1]ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
[2]Інжинірингова компанія «ЕЛМЕТ-РОЛ». 03150, м. Київ, а/с 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua
[3]ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна».
69008, м. Запоріжжя, Південне шосе, 81. E-mail: info@dss.com.ua

Дослідно-промислове випробування показало, що метал зливків зі сталі 15Х11МФ за основними показниками хімічного складу, мікро- та макроструктурою і механічними властивостями виготовлених прутків, виплавлених під дослідним шлаком АНФ-39 ($32CaF_2/31Al_2O_3/30CaO/4MgO/3SiO_2$), не поступається такому виготовленому з використанням АНФ-6 ($70CaF_2/30Al_2O_3$), який серійно застосовується за діючою технологією. Порівняно зі шлаком АНФ-6 при використанні шлаку АНФ-39 досягнуто зниження вмісту оксидних включень на 0,5 бали, витрат електроенергії при електрошлаковому переплаві на 17 %, фінансових витрат на матеріали для виготовлення шлаку на 23…25 %, покращено екологічність шлаку завдяки зменшеному вмісту фтористого кальцію (більше ніж в 2 рази). Шлак АНФ-39 рекомендовано на заміну АНФ-6 для ЕШП легованих та високолегованих сталей в стаціонарних та коротких кристалізаторах. Бібліогр. 8, табл. 5, рис. 4.

Ключові слова: новий шлак; електрошлаковий переплав; енергоефективність; високолегована сталь; макро- і мікроструктура; неметалеві включення

Електрошлаковий переплав (ЕШП) є найбільш розповсюдженим процесом масового виробництва високоякісних зливків для виготовлення відповідальних виробів з легованих сталей та сплавів, який знаходить все більш широке використання в світі. Сьогодні наука, техніка і технологія електрошлакового переплаву швидко розвиваються, щоб забезпечувати вимоги споживачів (які постійно зростають) до якості металу та його конкурентоспроможність в порівнянні з продукцією інших процесів спеціальної електрометалургії та традиційної металургії, які також не стоять на місці. Започатковані в ІЕЗ ім. Є.О. Патона електрошлакові технології виробництва зливків різної маси і форми із різноманітних сталей і сплавів продовжують дослідники і виробники обладнання в багатьох країнах. Сьогодні вже створено ціле сімейство електрошлакових технологій, яке включає традиційний переплав в короткому та стаціонарному кристалізаторі, прискорений ЕШП, вакуумний ЕШП, електрошлаковий процес з рідким металом для виробництва суцільних та порожнистих зливків і електрошлакове наплавлення. І це далеко не повний перелік видів реалізації електрошлакового переплаву. Загальним є те, що всі ці процеси потребують шлаків, які були б економічними, енергоефективними, екологічними і недорогими. В сучасній практиці вітчизняного електрошлакового процесу використовують переважно шлаки, які було створено більш як півстоліття тому, коли і умови і вимоги були іншими. Тому нами було поставлено задачу розробити вітчизняний аналог зарубіжного шлаку ESR2015, який є найбільш вживаним для ЕШП високоміцних сталей та сплавів для енергетичного і хімічного машинобудування тощо. В результаті дослідження фізико-хімічних властивостей шлаків системи $CaF_2–Al_2O_3–CaO$ з додаванням оксиду магнію і оксиду кремнію такий склад було створено і за традицією названо АНФ-39 (флюс за номером 39). Далі будемо використовувати термін «шлак» замість «флюс», як такий, що більше відповідає назві процесу ЕШП і співпадає з означенням в англомовній літературі. В данному матеріалі ми наводимо підсумки випробування технології виготовлення та використання цього шлаку в дослідно-промисловому масштабі.

Дослідно-промислова виплавка шлаку АНФ-39. Виплавку шлаку АНФ-39 виконали на ПрАТ «Запоріжсклофлюс» з використанням флюсоплавильної триелектродної електропечі (рис. 1, *а*) [1].

Плавку шихтували з залишків шлаку АНФ-6 в печі і сировинних компонентів з розрахунку на одержання середнього значення інтервалу вмісту

Г.П. Стовпченко — https://orcid.org/0000-0002-6555-5715, Л.О. Лісова — https://orcid.org/0000-0002-3758-0294
Я.В. Гусєв — https://orcid.org/0000-0003-1803-3604, Л.Б. Медовар — https://orcid.org/0000-0003-2077-5965

© Г.П. Стовпченко, С.В. Давидченко, Л.О. Лісова, Я.В. Гусєв, Л.Б. Медовар, 2020

Рис. 1. Зовнішній вигляд установки для виплавки флюсу (*а*) та процес грануляції флюсу АНФ-39 стисненим повітрям (*б*)

Таблиця 1. Вимоги нормативних документів до складу (мас. %) дослідного АНФ-39 та порівняльного АНФ-6 шлаків

Шлак	CaF_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	C	Fe_2O_3	S	P	Нормативний документ
АНФ-39	29…35	30…36	27…32	2…4	1…3	≤ 0,10	≤ 0,5	≤ 0,04	≤ 0,02	ТУ У 20.5-05416923-112:2015
АНФ-6	Основа	25…31	≤ 8	–	≤ 2,5	≤ 0,10	–″–	≤ 0,05	–″–	ГОСТ 30756

Таблиця 2. Хімічний склад шлаку АНФ-39 дослідної партії, мас. %

Шлак	CaF_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	C	Fe_2O_3	S	P
АНФ-39	29,33	34,52	29,82	2,83	1,62	0,11	0,44	0,02	0,02

компонентів відповідно до розробленого хімічного складу шлаку (табл. 1).

Вміст домішок в ТУ було прийнято за рекомендаціями ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» (далі ПрАТ «Дніпроспецсталь») згідно з їх багаторічним досвідом використання шлаків ЕШП.

Спочатку розплавили залишок шлаку АНФ-6 попередньої плавки (552 кг), після чого в піч поступово додавали необхідні матеріали в розрахованій кількості, кг: флюорит — 110; вапно — 710, магнезит — 40, глинозем — 305. Загалом на завантаження шихтових матеріалів було витрачено приблизно 40 хв. Після розплавлення всіх компонентів взяли пробу на хімічний аналіз, за результатами якого до шлаку було додано ще 80 кг вапна та 10 кг магнезиту.

Після одержання кінцевого хімічного аналізу шлаковий розплав злили з печі при температурі 1610 °С у сталеву виливницю, яку було оснащено пристроєм для гранулювання розплаву стисненим повітрям (рис. 1, *б*). На наведеному фото добре видно, як зустрічний потік повітря розбиває струмінь шлаку на дрібні краплі. Метою гранулювання було забезпечити розміри зерен шлаку в межах 0,2…2,0 мм. Відповідно до складених ТУ У 20.5-05416923-112:2015 кількість зерен розміром менш 0,2 мм не повинна перевищувати 15 %, а більш 2,0 мм — 3 % від маси шлаку.

Одержаний шлак подрібнили та просіяли через сито, задрібні та завеликі фракції, які не відповідали технічним умовам, повернули назад на переплав.

Хімічний склад шлаку АНФ-39 (табл. 2) повністю відповідав розробленим за участю виробника і споживача технічним умовам на дослідну партію (ТУ У 20.5-05416923-112:2015).

Вхідний аналіз ПрАТ «Дніпроспецсталь» показав дещо підвищені вмісти вуглецю (0,11 проти бажаного не більш як 0,06 мас. %) і оксиду заліза Fe_2O_3 (0,7 замість 0,5 мас. %). Виплавлену в промислових умовах дослідну партію флюсу АНФ-39 в кількості 850 кг було передано для подальшого випробування.

Дослідно-промислове випробування шлаку АНФ-39 при електрошлаковій виплавці високолегованих сталей. Для дослідно-промислового

випробування шлаку нового складу було обрано дві марки сталі — 15Х11МФ і 15Х12Н2МВФАБ-Ш (ЕП517-Ш) та виготовлено по два зливки масою 4,3 т (дослідні і порівняльні).

Метал зливків обох марок сталі, переплавлених під новим і порівняльним шлаками, успішно пройшов всі випробування і був відвантажений замовнику. Для сталі 15Х11МФ об'єм досліджень був більшим, тому нижче будуть приведені результати, одержані при здаточному і дослідницькому контролі її структури і властивостей.

Сталь 15Х11МФ відноситься до групи жаростійких сталей мартенситного класу. Вона призначена для виготовлення робочих та направляючих лопаток парових турбін (ГОСТ 5632 [2]), а також поковок, бандажів та інших деталей для роботи в навантаженому стані при високих температурах (550…580 °С) протягом тривалого часу.

ПрАТ «Дніпроспецсталь» виготовляє з цієї сталі доволі широкий асортимент продукції: прутки і полоси гарячекатані, сортовий прокат круглий, квадратний, гарячекатаний та кований, фасонні прутки [3]. Використання електрошлакового переплаву для цієї сталі забезпечує покращені характеристики механічних та службових властивостей завдяки зниженню вмісту неметалевих включень.

При електрошлаковому переплаві на ПрАТ «Дніпроспецсталь» найбільш широко застосовується шлак АНФ-6, який і було обрано у якості порівняльного (табл. 1). Обидва шлаки прожарювали у відповідності до вимог ТИ 145-Ш-1 при температурі більш ніж 700 °С понад 4 год і товщині шару шлаку в піддоні до 400 мм.

Плавки з використанням нового і порівняльного шлаку виконували на печі ОКБ 1065 за стандартною технологією з електродів однакового хімічного складу (плавка ДСП А02467). Переплав вели в стаціонарному кристалізаторі діаметром 565×565 мм з наддувом інертного газу (аргон) під кришку і додаванням алюмінію по ходу плавки для розкислення шлаку (витрата шлаку 200 кг).

Швидкість плавлення електроду та формування зливку при використанні нового шлаку АНФ-39 були вищими на 15…20 %, ніж при використанні шлаку АНФ-6. Було виплавлено два дослідних зливки масою по 4,3 т.

Витрати електроенергії при переплаві зі шлаком АНФ-6 склали 1729…1825 кВт·год/т, а АНФ-39 — 1469…1496 кВт·год/т (зниження витрати електроенергії на 17 %).

Візуальний огляд поверхні зливків експериментальних плавок показав, що при використанні нового шлаку поверхня гладка, глибокі гофри, заливини і тріщини повністю відсутні (рис. 2).

Рис. 2. Зовнішній вигляд поверхонь дослідного (знизу) і порівняльного (зверху) зливків ЕШП зі сталі 15Х11МФ

Будь-яких суттєвих відмінностей якості поверхні зливку, виплавленого під експериментальним шлаком АНФ-39 від такого ж, що виплавляли під стандартним АНФ-6, не спостерігалося. Гарнісаж на поверхні зливків був тонким (до 3 мм) і переважно рівномірним (дещо товщим до 5 мм в нижній частині). Після охолодження зливка гарнісаж довільно відлущився.

Оцінка якості виплавленого металу. Для всебічної оцінки металургійної якості обох зливків було відібрано проби (для визначення хімічного складу сталі за ГОСТ 7565 [4], для механічних випробувань за ГОСТ 7564 [5]) від підкату на різних етапах їх подальшої обробки. Хімічний склад, макро- та мікроструктура металу наведені в табл. 3.

Порівняння результатів спектрального хімічного аналізу металу дослідної (№ 685327 під шлаком АНФ-39) та порівняльної (№ 685326 під шлаком АНФ-6) плавок сталі 15Х11МФ показало, що вміст контрольованих елементів є однаковим за виключенням хрому, втрати якого з металу електроду при використанні АНФ-39 були незначно вищими — до 0,07 проти до 0,02 % при плавці під АНФ-6, що може бути викликано коливанням його вмісту по висоті вихідного електроду. Підвищення вмісту вуглецю в металі, якого очікували, зважаючи на його підвищений вміст в дослідному шлаку, не відбулося. Навпаки меншими були втрати алюмінію (до 0,007 % при АНФ-39 у порівнянні з 0,012 % при АНФ-6). Вміст алюмінію для даної марки сталі не регламентується. Хімічний склад виплавленої сталі обох зливків не виходить за межі стандарту.

Дослідження макро- та мікроструктури зливків було виконано на темплетах з прокатаного металу (ГОСТ 18968 [6]) з метою визначення морфології та розміру неметалевих включень за стандартною процедурою здаточного контролю.

Макроструктура заготовок обох плавок щільна, однорідна, дрібнозерниста (рис. 3).

Таблиця 3. Хімічний склад металу зливків ЕШП сталі 15Х11МФ-Ш за ГОСТ 18968–73, переплавлених зі шлаками АНФ-6 (діюча технологія) і АНФ-39 (дослідна технологія), мас. %

№ плавки/шлак	Проба	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni
Електрод А02467	К	0,14	0,11	0,24	10,37	0,020	0,007	0,20
685326/АНФ-6	Н5/№1797	0,15	0,13	0,22	10,35	0,021	0,003	0,21
Приріст (+) або втрата (–) проти вмісту в електроді (Н5-К)		+0,01	+0,02	–0,02	–0,02	+0,001	–0,004	+0,01
685327/АНФ-39	А1/№1798	0,150	0,13	0,24	10,30	0,019	0,003	0,21
	Н1/№1798	–″–	0,14	0,20	10,37	0,022	–″–	–″–
	А2/№1798	–″–	0,13	0,21	10,32	0,021	–″–	0,20
	Н2/№1798	–″–	0,14	0,22	10,41	0,022	–″–	0,22
Приріст (+) або втрата (–) проти вмісту в електроді ((А1+А2)/2–К)		+0,01	+0,02	–0,02	–0,06	0,0	–0,004	+0,01
Приріст (+) або втрата (–) проти вмісту в електроді ((Н1+Н2)/2–К)		–″–	+0,03	–0,03	+0,02	+0,002	–″–	+0,02
Вимоги до складу 15Х11МФ-Ш за ГОСТ 18968-73/ГОСТ 5632–75		0,12…0,19	≤0,70	≤0,5	10,0…11,5	≤0,030	≤0,015	≤0,60

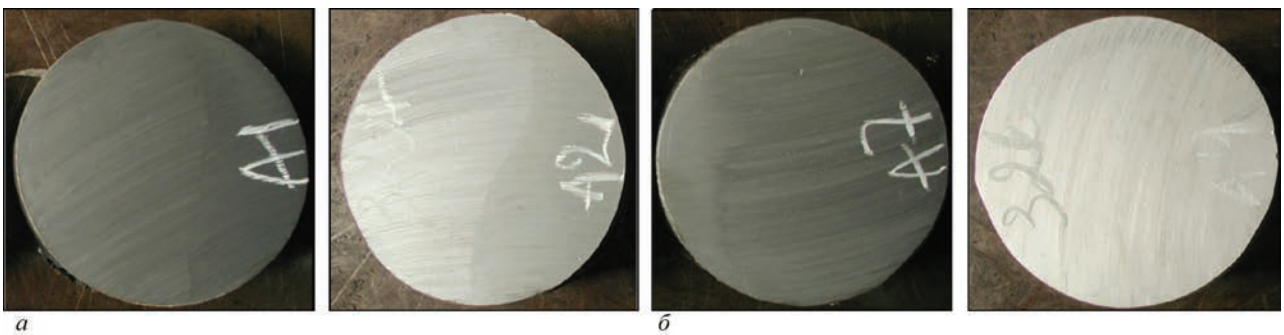
Закінчення табл. 3

№ плавки/шлак	Проба	W	V	Mo	Ti	Al	Cu
Електрод А02467	К	0,02	0,30	0,65	0,01	0,029	0,14
685326/АНФ-6	Н5/№1797	0,03	0,31	0,64	0	0,007	–″–
Приріст (+) або втрата (–) проти вмісту в електроді (Н5-К)		+0,01	+0,01	–0,01	–0,01	–0,022	0
685327/АНФ-39	А1/№1798	0,03	0,31	0,64	0,01	0,020	0,16
	Н1/№1798	–″–	0,30	–″–	0	0,022	0,15
	А2/№1798	–″–	–″–	–″–	0,01	0,021	–″–
	Н2/№1798	–″–	–″–	–″–	0	0,026	0,14
Приріст (+) або втрата (–) проти вмісту в електроді ((А1+А2)/2–К)		+0,01	+0,01	–0,01	0,0	–0,009	+0,015
Приріст (+) або втрата (–) проти вмісту в електроді ((Н1+Н2)/2–К)		–″–	0,0	–″–	–0,01	–0,005	+0,005
Вимоги до складу 15Х11МФ-Ш за ГОСТ 18968-73/ГОСТ 5632–75		≤0,2	0,25…0,40	0,6…0,8	≤0,2	–	≤0,30

На всіх досліджуваних темплетах жодних слідів усадкової пористості, бульбашок, тріщин і шлакових включень знайдено не було. За шкалами ГОСТ 10243 на всіх пробах центральну пористість (ЦП) та точкову неоднорідність (ТН) оцінено в 0,5 бала. Метал, виплавлений під дослідним шлаком АНФ-39, пройшов успішно всі кваліфікаційні випробування.

При додатковому дослідницькому контролі забрудненості неметалевими включеннями (табл. 4) за шкалами ГОСТ 1778 [7] встановлено, що зразки металу дослідної плавки під шлаком АНФ-39 мають бал оксидних стрічкових (ОС) включень на 0,5 менше, ніж в металі порівняльної плавки під АНФ-6 (рис. 4).

Енергодисперсійним аналізом складу неметалевих включень в порівняльному і дослідному металі встановлено, що в обох випадках вони мають аналогічний склад і представлені оксидами Al_2O_3, (MgO) Al_2O_3 та сульфідами MnS, CaS, що мають переважно глобулярну форму.



а *б*

Рис. 3. Макроструктура заготовок зі сталі 15Х11МФ (прокат, круг 100/105 мм) зі зливків, виплавлених під дослідним АНФ-39 (*а*) та порівняльним АНФ-6 (*б*) шлаками

Таблиця 4. Результати дослідницького контролю забрудненості неметалічними включеннями

№ плавки	Профіль, мм	Зразок	Оцінка неметалевих включень за ГОСТ 1778							
			ОС	ОТ	СХ	СП	СН	С	НС	НТ
685326	105/100	А7	1,0	0,5	0	0	0,5	0	0	0
		А9	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–
685327	105/100	А1	0,5	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–
		А2	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–	–″–

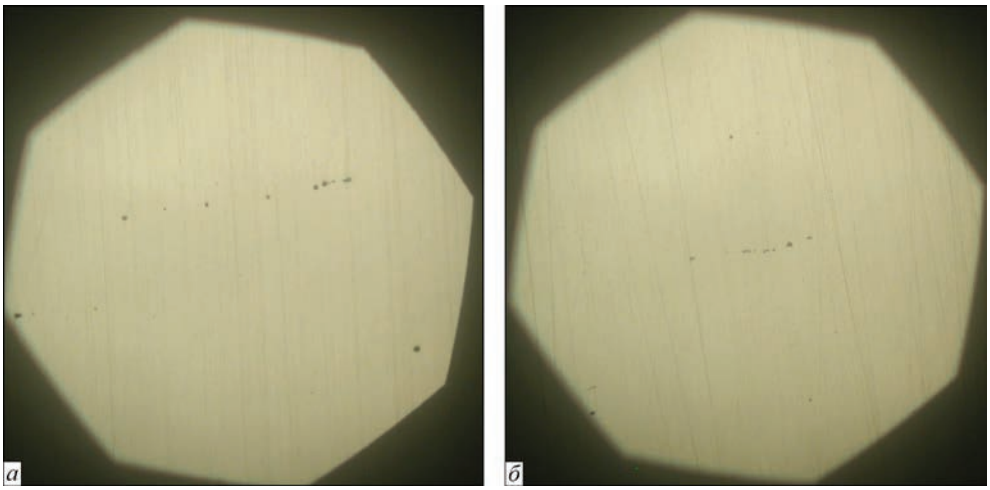


Рис. 4. Неметалеві включення (ОС) в металі прутків діаметром 105 мм зі зливків сталі 15Х11МФ-Ш, виплавлених із використанням шлаку АНФ-6 (*а*) та АНФ-39 (*б*), ×100

Механічні випробування виконали за стандартною процедурою на готових катаних прутках (табл. 5).

Метал, виплавлений під шлаком АНФ-39, показав аналогічний рівень межі текучості, тимчасового опору розриву та ударної в'язкості і підвищення відносного подовження на 12,5 %. Середні значення твердості металу зменшилися приблизно на 5 одиниць. Всі результати механічних випробувань повністю відповідають нормативним значенням.

На підставі виконаних досліджень можна зробити висновок, що за основними показниками хімічного складу, мікроструктурою і механічними властивостями виготовлених прутків метал зливків сталі 15Х11МФ, виплавлених під дослідним шлаком АНФ-39, не поступається такому виробленому з використанням АНФ-6, який серійно застосовується за діючою технологією.

Дослідно-промислове випробування показало, що відмінність компонентного складу шлаків не вплинуло на якість виплавленого металу. Співставна якість металу складних легованих марок сталі, що були переплавлені під новим шлаком, і покращення енергетичної ефективності процесу плавки дозволяють рекомендувати його використання замість АНФ-6 при виробництві продукції відповідального призначення.

Оцінка економічної та екологічної ефективності електрошлакового переплаву з використанням шлаку АНФ-39. Економічна ефективність та більша екологічність нового шлаку обумовлена зниженим більш як вдвічі (порівняно з АНФ-6) вмістом в ньому фтористого кальцію (CaF_2).

Флюорит (плавиковий шпат), який є сировинним джерелом фториду кальцію, є найбільш дорогим і екологічно небезпечним компонентом. Розрахунок вартості компонентів, що входять до складу

Таблиця 5. Результати механічних випробувань прутків 105/100 мм за ГОСТ 18986

№ плавки/шлак	Зразок	Межа текучості ($\sigma_т$), МПа	Тимчасовий опір розриву ($\sigma_в$), МПа	Відносне подовження (δ), %	Відносне звуження (ψ), %	Ударна в'язкість (*KCV*), Дж/см^2
				Повздовжній напрям волокна		
685326/АНФ-6	А7	630	830	16,0	63,0	6,5
–″–	Б7	640	–″–	–″–	64,0	–″–
685327/АНФ-39	БЛ2	–″–	840	18,0	63,0	6,7
–″–	Н2	–″–	850	–″–	–″–	6,3
ГОСТ 18968-7360	–	60…77	≥75	≥15	≥50	≥6

порівнюваних шлаків (за середньо ринковими цінами станом на березень 2020 р., дол/т: флюорит (CaF_2) — 400…450, глинозем (Al_2O_3) — 300…350, вапно (CaO) — 60…80, магнезит (MgO) — 200…250) показав, що витрати на матеріали в собівартості шлаку АНФ-39 (250…290 дол/т) будуть менші приблизно на 23…25 % ніж для АНФ-6 (340…390 дол/т).

Оскільки вміст фтористого кальцію в шлаку АНФ-39 більш як в два рази менший ніж у АНФ-6, при його застосуванні знизиться рівень забруднення повітря фторидами, що покращить екологію в цеху та зменшить шкідливий вплив на довкілля при його утилізації.

Як показало дослідно-промислове випробування на ПрАТ «Дніпроспецсталь» шлак АНФ-39 дає суттєву економію при виробництві високолегованих сталей за рахунок зниження витрат електроенергії на 17 % порівняно з АНФ-6.

На підставі результатів дослідно-промислового випробування АНФ-39 при електрошлаковому переплаві і порівняння якості металу прутків з дослідних і серійних (переплав з АНФ-6) зливків, новий шлак рекомендовано на заміну шлаку АНФ-6 для ЕШП легованих і високолегованих сталей відповідального призначення в стаціонарних кристалізаторах, а з врахуванням його фізико-хімічних властивостей [8] також і в коротких кристалізаторах з витягуванням зливка.

Висновки

1. В умовах ПрАТ «Запоріжстеклофлюс» виготовлено дослідно-промислову партію плавленого шлаку АНФ-39 сухої грануляції з вмістом основних компонентів відповідно розробленим технічним умовам.

2. Дослідно-промислове випробування на ПрАТ «Дніпроспецсталь» шлаку АНФ-39 при електрошлаковому переплаві серійних зливків з високолегованих сталей показало повну відповідність хімічного складу і показників якості металу прутків, виготовлених з дослідного зливка сталі 15Х11МФ, вимогам стандарту. В порівнянні з металом зливка, виплавленого з електроду аналогічного складу під шлаком АНФ-6, показано зменшення забрудненості металу оксидними стрічковими неметалевими включеннями на 0,5 бали і підвищення відносного подовження на 12,5 %.

3. При використанні шлаку АНФ-39 досягнено зниження витрат електроенергії на 17 %, що підвищує конкурентоспроможність металу електрошлакового переплаву.

4. Розрахункова вартість матеріалів для виробництва шлаку АНФ-39 приблизно на 23…25 % нижча, ніж для шлаку АНФ-6.

5. Шлак АНФ-39 рекомендовано на заміну шлаку АНФ-6 для ЕШП легованих і високолегованих сталей в стаціонарних і коротких кристалізаторах.

Список літератури

1. *ПрАТ «Запоріжсклофлюс»*. https://www.steklo-flus.com
2. (1997) ГОСТ 5632–75. *Стали высоколегированные и сплавы корозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Москва, ИПК Издательство стандартов*.
3. *ПрАТ «Днепроспецсталь». Марочный и профильный сортамент*. http://www.dss-ua.com/rus/product/grades/steel.wbp?catalog.root-node-id=01577d88-7f00-0001-01b9-ce4be05a547a
4. (2009) ГОСТ 7565–81. *Чугун сталь и сплавы. Метод отбора проб для определения химического состава*. Москва, Стандартинформ.
5. (2004) ГОСТ 7564–97. *Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний*. Минск, Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации
6. (1974) ГОСТ 18968–73. *Прутки и полосы из корозионно-стойкой и жаропрочной стали для лопаток паровых турбин. Технические условия*. Москва, Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.
7. (1970) ГОСТ 1778–70. *Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений*. Москва, Государственный стандарт СССР.
8. Лісова Л.О., Стовпченко Г.П., Гончаров І.О. та ін. (2020) Термодинаміка взаємодії та фізичні властивості шлаків системи $30CaF_2/30CaO/30Al_2O_3$ з додаванням SiO_2 та MgO у різному співвідношенні при електрошлаковому переплаві. *Сучасна електрометалургія*, **1**, 8–13.

References

1. *Prjsc «Zaporizhskloflus»*. https://www.steklo-flus.com [in Ukrainian and English].
2. GOST 5632–75 *High alloy steels and corrosion-proof, heat-resisting and heat-treated alloys. Types. official publication*. Moscow, IPC Standards Publishing [in Russian].
3. *PJSC «Dneprospetsstal». Brand and specialized assortment.* http://www.dss-ua.com/rus/product/grades/steel.wbp?catalog.root-node-id=01577d88-7f00-0001-01b9-ce4be05a547a [in Russian].
4. GOST 7565–81 *Iron, steel and alloys. Sampling for determination of chemical composition.* Moscow, Standardinform [in Russian].
5. GOST 7564–97 *Rolled products. General rules of sampling, rough specimens and test pieces selection for mechanical and technological testing.* Minsk, Euro-Asian Council for standardization, metrology and certification [in Russian].
6. GOST 18968–73 *Rods and strips of corrosion-resisting and heat-resisting steels for steam turbine blades. Technical conditions*. Moscow, Euro-Asian Council for standardization, metrology and certification [in Russian].
7. GOST 1778–70 *Steel. Metallographic methods for the determination of non-metallic inclusions*. Moscow, State Standard of the USSR Union [in Russian].
8. Lisova, L.O., Stovpchenko, G.P., Goncharov, I.O. et al. (2020) Thermodynamics of interaction and physical properties of $30CaF_2/30CaO/30Al_2O_3$ system slags with addition of SiO_2 and MgO in different ratios in electroslag remelting. *Suchasna Elektrometalurgiya*, **1**, 8–13 [in Ukrainian].

INVESTIGATION OF MANUFACTURABILITY AND EFFECTIVENESS OF THE NEW SLAG FOR ELECTROSDLAG REMELTING

G.P. Stovpchenko[1,2], S.V. Davidchenko[3], L.O. Lisova[1], Ya.V. Gusev[1], L.B. Medovar[1]
[1]E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua
[2]Engineering Company «ELMET-ROLL». P.o. 259, 03150, Kyiv. E-mail: office@elmet-roll.com.ua
[3]PJSC A.M.Kuzmin «Electrometallurgical Plant «Dniprospetsstal».
81 Pivdenne Highway, 69008, Zaporizhzhya. E-mail: info@dss.com.ua

Pilot trials testified that by the main characteristics of chemical composition, micro- and macrostructure, and mechanical properties of the manufactured bars, the metal of ingots from 15Х11МФ (15Cr11MoV) steel, melted under the developed slag ANF-39 ($32CaF_2/31Al_2O_3/30CaO/4MgO/3SiO_2$), is highly competitive with the products, remelted using slag ANF-6 ($70CaF_2/30Al_2O_3$), which is applied in batch production by the current technology. Compared to slag ANF-39, application of slag ANF-6 allowed reducing oxide inclusion content by 0.5 points and power consumption at electroslag remelting by 17 %; the slag is more eco-friendly due to lowering calcium fluoride content more than 2 times; the cost of materials for slag production was reduced by 23…25 %. Slag ANF-39 is recommended for replacement of ANF-6 for ESR of alloyed and high-alloyed steels in stationary and short-collar molds. Ref. 8, Tabl. 5, Fig. 4.

Key words: new slag; electroslag remelting; energy effectiveness; high-alloyed steel; macro- ad microstructure; nonmetallic inclusions

Надійшла до редакції 03.08.2020