

Аналіз використання електрошлакових технологій для рециклінгу сталеві стружки

Статтю присвячено проблемі переробки сталеві стружки. Показано, що електрошлакова плавка має високі рафінуючі можливості для отримання зі стружки, що має підвищену забрудненість, якісного металу. Розглянуто особливості різних методів електрошлакової плавки некомпактної шихти. Відзначено перспективність переробки небрикетованої стружки методом електрошлакової тигельної плавки (ЕШТП). При плавці високовуглецевої сталі можливе використання як струмопідводу невитратного графітованого електрода. При переробці низько- і середньовуглецевих сталей і сплавів в якості струмопідводу необхідно використовувати металевий витратний електрод з тієї ж марки металу, що і стружка. Виконано дослідження та експерименти зі спільної плавки в електрошлаковій тигельній печі ємністю 120 кг стружки і витратного електрода з жароміцних сплавів ХН70ВМТЮФ, ХН75МБТЮ та нержавіючої сталі Х18Н10Т. При кількості стружки, що подається на плавку, 50–55 % від загальної маси металу, що переплавляється, і повному завантаженні печі питома витрата електроенергії становила від 0,48 до 0,55 кВт·год/кг, а продуктивність — від 141,4 до 170,5 кг/год. Вміст легуючих елементів у жароміцних сплавах і нержавіючій сталі за рахунок коригування складу шлаку та можливості долегування по ходу плавки був в межах марочного складу для цих металів. Високу якість металу, що одержується з відходів методом ЕШТП, підтверджують дані механічних випробувань матеріалу плит товщиною 65 і 80 мм зі сталі Х18Н10Т, які за всіма показниками перевищують вимоги технічних умов на подібні литі заготовки. Виконаний аналіз показує перспективність застосування електрошлакової тигельної плавки для рециклінгу сталеві стружки.

Ключові слова: стружка, рециклінг, електрошлакова плавка, витратний електрод, метал, хімічний склад, якість.

Вступ. Створення ефективних технологій переробки та залучення у виробництво промислових відходів є одним із найважливіших напрямів розвитку сучасної науки та техніки. Стосується це й відходів сталей та сплавів, що утворюються на різних стадіях виготовлення та обробки металопродукції. Серед металевих відходів найбільшу складність становить рециклінг стружки внаслідок її підвищеної забрудненості сторонніми домішками, наявності на поверхні оксидної складової та малої насипної маси [1]. Проте стружку для виключення надмірного накопичення необхідно переробляти. Це доцільно і з економічної точки зору, особливо за наявності в ній цінних легуючих елементів, таких як нікель, хром, молібден, вольфрам та інші.

Сталева легована стружка переробляється головним чином шляхом її переплаву в малотоннажних дугових печах або індукційних печах. Для полегшення процесу плавки та зменшення втрат на вигар стружку попередньо брикетують. Стружка з низьковуглецевої та малолегованої сталі досить до-

бре пресується у міцні брикети у холодному стані. А для брикетування менш пластичної стружки з високолегованої, жароміцної або інструментальної сталі необхідне або потужне пресове обладнання, або попереднє нагрівання до стану розм'якшення, у тому числі із застосуванням спеціальних методів компактування [2, 3].

Аналіз застосування електрошлакової плавки для переробки стружки. Крім брикетування через забруднення стружки сторонніми домішками при отриманні, збиранні, зберіганні та транспортуванні, виплавлений з неї метал необхідно рафінувати. Добре відомі рафінуючі можливості електрошлакового переплаву, де метал очищується від небажаних домішок високоактивним шлаком. Це показали і результати електрошлакового переплаву (ЕШП) у водоохолоджуваному кристалізаторі стружки із жароміцної сталі ЕП609 і нержавіючої сталі Х18Н10Т, яка попередньо була спресована у витратний електрод методом компактування під струмом [4]. Отримані таким чином зливки мали щільну однорідну структуру, а метал мав нижчий вміст сірки та неметалевих

включень порівняно з металом вихідної стружки. Механічні властивості сталей ЕП609 та Х18Н10Т відповідали технічним умовам на метал цих марок. Успішно застосовується на одному з підприємств України рециклінг стружки штампових сталей за методом, описаним у патенті [5]. Технологія передбачає холодне пресування стружки в брикети, їх з'єднання зварюванням у витратні електроди, які піддаються електрошлаковому переплаву з отриманням заготовок під нові штампи.

Отримання зі стружки витратного електрода пов'язане з додатковими витратами енергетичних і матеріальних ресурсів. Причому вони, особливо при нагріванні стружки до пластичного стану, можуть перевищувати витрати на плавку. Тому розробляються технології електрошлакової плавки металеві стружки без попереднього брикетування. Причиною для цього є те, що при порівняно невеликій товщині стружка має розвинену площу поверхні. Як показують результати математичного моделювання, час плавлення стружки в рідкому шлаку визначається головним чином її товщиною і температурою шлаку [6]. Так при товщині 2—3 мм та температурі шлаку 1650—1700 °С сталева стружка нагрівається до температури плавлення за кілька секунд. Це підтверджують і дані робіт з електрошлакового відновлення штампів шляхом електрошлакового нагріву їх робочої поверхні та використання як присадкового матеріалу стружки [7]. За такої технології в наплавленому шарі не виявлялися фрагменти стружки, тобто вона повністю розплавляється, проходячи через шар шлакової ванни.

Для реалізації процесу електрошлакової плавки некомпактної шихти як струмопідвідний елемент від джерела живлення (трансформатора) до шлаку найчастіше використовують графітований електрод. Тоді електрошлакова плавка стружки може здійснюватися за схемою, показаною на рис. 1.

Саме так здійснювалася переробка стружки сталі Р6М5 у кристалізаторах діаметром 125 та 150 мм з використанням у якості струмопідводу графітових електродів діаметром 40 та 50 мм [8]. Згідно з наведеними даними отриманий метал внаслідок дрібнодисперсної структури та рафінування має високі механічні властивості. А стійкість фрез, виготовлених з отриманих заготовок, вище в порівнянні з аналогічними показниками інструменту, виготовленого зі сталі Р6М5 промислового виробництва.

Порожнистий графітовий накінецьник, з'єднаний з металевою трубою, використовувався як струмопідвідний електрод при переплаві стружки хромо-нікель-вольфрамової сталі ЗІ961 на Новокраматорському машинобудівному заводі [9]. Плавки здійснювали в кристалізаторі Ø 305 мм шляхом подачі дробленої стружки в середину електрода. Швидкість плавки при використанні суміші шлаків АНФ-6 (65 %) та АН-291 (35 %) становила 3,5...4,0 кг/хв. Питомі витрати електроенергії склали 1500 кВт·год/т при питомих витратах флюсу 100 кг/т. В отриманих зі стружки злитках були відсутні шлакові включення та нерозплавлена стружка.

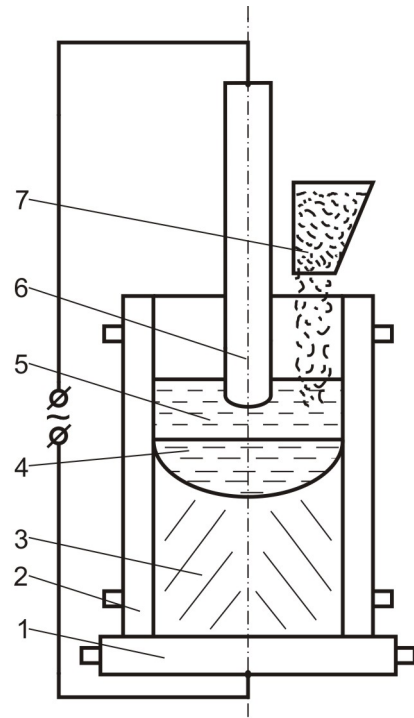


Рис. 1. Схема електрошлакової плавки стружки з використанням невитратного електрода в водоохолоджуваному кристалізаторі: 1 — піддон; 2 — водоохолоджуваний кристалізатор; 3 — зливоч; 4 — металева ванна; 5 — шлакова ванна; 6 — невитратний графітований електрод; 7 — стружка

По суті така сама технологічна схема переробки металеві стружки з використанням порожнистого графітованого електрода пропонується у роботі [10]. Це дозволяє подавати стружку через наскрізний отвір у графітовій трубі безпосередньо в центральну, найбільш розігріту зону шлакової ванни. Отримані таким чином зі сталі 35ХГСА злитки мали однорідну щільну структуру, яка була подібною до злитків, отриманих переплавом звичайного сталевго електрода.

Наведені приклади показують, що електрошлакова плавка з використанням невитратного струмопідвідного графітованого електрода є достатньо ефективним способом переробки металеві стружки. Однак взаємодія такого електрода з компонентами шлаку з утворенням карбідів та їх подальшого надходження до металу може призвести до підвищення вмісту вуглецю в останньому. Це зазначається й у роботі [10], де при переплаві стружки сталі 35ХГСА під шлаками АНФ-6, АНФ-29 та АНФ-32 не було науглецювання металу тільки при використанні шлаку АНФ-32. Але процес перерозподілу вуглецю в системі графітовий електрод-шлак-метал визначається не тільки складом металу та шлаку, але багато в чому температурними умовами плавки [11]. Тому застосування графітованого струмопідводу можливе при переробці стружки з високовуглецевих сталей. А стосовно середньо-, а тим більше низьковуглецевих сталей і сплавів це небажано.

Відомо про застосування для здійснення електрошлакового процесу металевих водоохолоджуваних електродів, у яких занурений у шлак накінецьник

виготовляють із міді, молібдену або спеціальної конструкції з впаєними у мідний корпус стрижнями із тугоплавких металів — вольфраму або молібдену [12]. Наприклад, при переробці стружки з суперсплавів використовувався молібденовий водоохолоджуваний струмопідвід [13]. Однак металеві струмопідводи в тій чи іншій мірі розчиняються в шлаку, забруднюючи метал, що переплавляється, та мають обмежений ресурс роботи. Крім того, на охолодження таких електродів втрачається досить багато тепла, що призводить до збільшення витрат електроенергії на переробку стружки.

Свого роду невитратним водоохолоджуваним електродом при електрошлаковій плавці у струмопідвідному кристалізаторі (СПК) є верхня його секція (рис. 2). Є відомості про використання такого кристалізатора для плавки в шарі шлаку різної некомпактної дискретної шихти, у тому числі сталевий

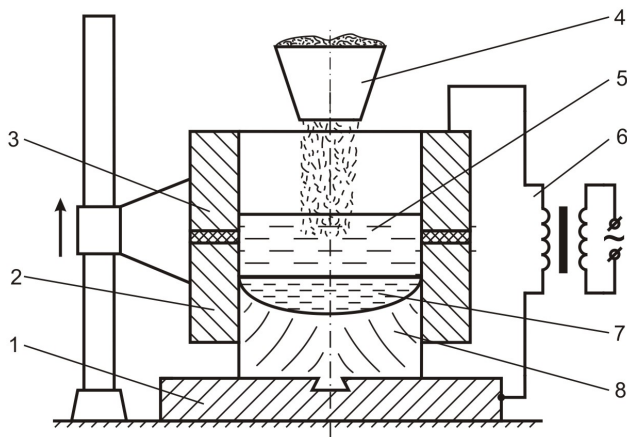


Рис. 2. Схема плавки некомпактних відходів у струмопідвідному кристалізаторі: 1 — піддон; 2 — формуюча секція кристалізатора; 3 — струмопідвідна секція кристалізатора; 4 — бункер із шихтою; 5 — шлакова ванна; 6 — джерело живлення; 7 — металева ванна; 8 — злиток стружки швидкорізальної сталі [14].

Порівняно з класичною електрошлаковою плавкою у водоохолоджувальному кристалізаторі перевагою переробки металевий стружки в СПК є відсутність струмопідвідного електрода з механізмами його кріплення та переміщення. Також наявність вільного дзеркала шлакової ванни полегшує подачу шихти на плавку. Однак у конструкції струмопідвідного кристалізатора передбачено використання захисного графітового кільця, що може призвести до науглецювання металу, що переплавляється. Крім того, такий кристалізатор призначений головним чином для наплавлення порівняно невеликого за масою шару металу та для високопродуктивної переробки великої кількості стружки мало придатний.

Проблеми із забрудненням металу, що переплавляється, матеріалом струмопідвідного невитратного електрода відсутні при електрошлаковій плавці некомпактних металевих відходів з використанням витратного електроду того ж складу, що і стружка. Тобто процес здійснюється так само, як показано на рис. 1, тільки замість графітового застосовується металевий витратний електрод. Ви-

тратний електрод може бути виготовлений різними способами, наприклад, зварюванням відповідного за розмірами брухту з металу тієї ж марки. За даними роботи [15] при переробці за такою схемою стружки сталі Р6М5 кількість її становила до 60—70 % від загальної маси металу, що переплавляється. Зазначається, що запропонований метод ЕШП некомпактних відходів дозволяє отримувати зливи з відходів інструментальної сталі, що повністю відповідає всім вимогам, що пред'являються до серійної продукції.

Незважаючи на можливості отримання якісного металу при спільній електрошлаковій плавці у водоохолоджуваному кристалізаторі витратного електрода і некомпактної шихти, такий метод переробки стружки має свої особливості, які необхідно враховувати при практичній реалізації технології.

При електрошлаковому переплаві металів, що мають у своєму складі такі елементи як титан, алюміній, хром, а це багато жароміцних сплавів і нержавіючих сталей, відбувається їх окиснення і вигар. Особливо це стосується плавки стружки, яка може деякий час знаходитися на поверхні шлакової ванни або поблизу неї і за високої температури взаємодіяти з навколишньою атмосферою. Для компенсації таких втрат найчастіше застосовують дозоване долегування по ходу плавки відповідними феросплавами, наприклад, феротитаном або ферохромом. Однак при наявності під час плавки в кристалізаторі порівняно невеликої за розмірами металевий ванни і високої швидкості кристалізації це не гарантує рівномірного розподілу елементів, що додаються, по висоті і перерізу виплавлюваних злитків. Той самий фактор — невелика глибина металевий ванни, викликає необхідність забезпечення повного розплавлення стружки при проходженні через шар шлакового розплаву. Для цього необхідно підтримувати досить високу температуру шлаку, що веде до підвищеної швидкості плавлення витратного електрода і, відповідно, меншого залучення стружки для переробки.

Ще однією важливою особливістю розглянутої технології є те, що стружка, що подається в зазор між електродом і кристалізатором, може торкатися їх одночасно. Це призводить до виникнення мікродуг, що супроводжуються дестабілізацією електрошлакового процесу та небезпекою підвищеного зносу стінки кристалізатора аж до її пропалювання. Також утворення мікродуг веде до підвищеного вигару металу, особливо згаданих елементів, що легко окислюються.

Зазначені вище особливості та обмеження відсутні при плавці стружки у футерованій ємності, так званій електрошлаковій тигельній плавці (ЕШТП). Цей вид електрошлакової технології знайшов широкі поширення саме для переробки різних металевих відходів. Так із застосуванням в якості струмопідводу графітованого електрода успішно переплавляються відходи мідних та алюмінієвих сплавів у вигляді стружки, січки та дрібних шматків [16, 17]. При ЕШТП можна не тільки переробляти подібні відходи, але й виплавляти певну марку мідного або алюмінієвого сплаву шляхом легування металу відповідними ком-

понентами. Наприклад, таким чином з мідних відходів виплавлялися бронзи марок КН1-3 та БРХ з легуванням накопиченої в тиглі рідкої міді у першому випадку нікелем, кремнієм та марганцем, а у другому — хромом [16, 18].

Виконані дослідження з переробки стружки жароміцних сплавів ХН70ВМТЮФ (ЭИ617), ХН75МБТЮ (ЭИ602) та нержавіючої сталі Х18Н10Т методом електрошлакової тигельної плавки за схемою, наведеною на рис. 3, показали широкі можливості такої технології [19, 20]. Експериментальні плавки проводили у футерованій вогнетривкою цеглою плавильній ємності, розрахованій на накопичення 120 кг рідкого металу (рис. 4). Витратний електрод із жароміцних сплавів готували шляхом пресування стружки під струмом, а з нержавіючої сталі — шляхом ручного зварювання зношених деталей. Після закінчення плавки рідкий метал із плавильної ємності зливався в ту чи іншу форму для виливки заготовок необхідного розміру. Наприклад, із сталі Х18Н10Т отримували заготовки діаметром 150 мм або плити завтовшки від 65 до 100 мм.

Як видно з наведених у табл. 1 даних при спільній електрошлаковій плавці в такому тиглі витратного електрода і стружки питома витрата електроенергії (q) складала від 0,48 до 0,78 кВт·год/кг при продуктивності (P) від 121,5 до 170,5. Найкращі показники досягалися при максимальному завантаженні тигля і кількості стружки, що перероблялась, 50—55 % від загальної маси переплавлюваного металу. За енергетичними витратами і продуктивністю спільна плавка витратного електрода і стружки методом ЕШТП знаходиться на рівні з аналогічними показниками при плавці

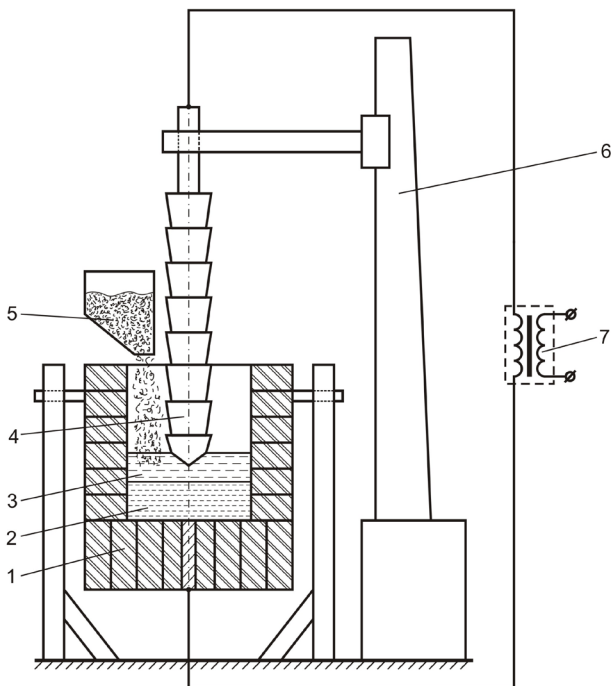


Рис. 3. Схема рециклінгу металевої стружки методом електрошлакової тигельної плавки: 1 — тигель; 2 — металева ванна; 3 — шлакова ванна; 4 — витратний металевий електрод; 5 — бункер із шихтою; 6 — направляюча колона з пересувним механізмом; 7 — джерело живлення



Рис. 4. Зовнішній вигляд плавильного тигля ємністю 120 кг для проведення ЕШТП стружки

Таблиця 2

Показники ЕШТП стружки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі

Метал	Маса металу, кг		q , кВт·год/ кг	P , кг/ год
	Електрод	Стружка		
ХН75МБТЮ	59,6	54,2	0,55	141,4
ХН75МБТЮ	60,0	56,3	0,53	145,0
ХН70ВМТЮФ	61,0	56,4	0,48	170,5
ХН70ВМТЮФ	39,1	35,5	0,60	145,6
Х18Н10Т	69,5	18,5	0,78	121,5
Х18Н10Т	59,6	60,2	0,55	145,4

Примітка: Питома витрата електроенергії (q) наведена без урахування втрат у джерелі живлення та короткої мережі.

шматкового брухту в індукційній тигельній печі.

Хімічний склад жароміцних сплавів та нержавіючої сталі, виплавлених з відходів, за рахунок коригування складу шлаку додаванням до нього оксиду титану та долегування на заключних стадіях плавки, відповідав вимогам технічних умов на ці марки металу. Механічні випробування зразків, відібраних із плит нержавіючої сталі, показали, що за всіма показниками метал перевершує вимоги технічних умов на литі вироби завтовшки до 100 мм (табл. 2). Це підтверджує можливість отримувати електрошлаковою плавкою зі сталевих низькосортних відходів, таких як стружка, метал високої якості.

Висновки

1. Електрошлакові технології мають високі рафінувальні можливості для отримання при плавці сталевих стружки якісного металу.

2. Серед різних методів електрошлакової плавки найбільш підходящою для переробки небрикетованої стружки є електрошлакова тигельна плавка (ЕШТП).

3. При сумісному плавленні в електрошлаковій тигельній печі ємністю 120 кг витратного електрода і стружки в кількості 50—55 % від загальної маси плавки питома витрата електроенергії становить

0,48—0,55 кВт•год/кг, а продуктивність — від 141,4 до 170,5 кг/год.

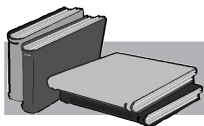
4. Хімічний склад та механічні властивості металу заготовок, отриманих плавкою методом ЕШТП брухту та стружки жароміцних сплавів ХН70ВМТЮФ,

ХН75МБТЮ та нержавіючої сталі Х18Н10Т, відповідають вимогам технічних умов на ці марки металу.

Таблиця 2

Механічні властивості металу плит із нержавіючої сталі

Товщина плити, мм	Т випр., °С	Межа плинності, $\sigma_{0,2}$, МПа	Тимчасовий опір розриву, σ_B , МПа	Відносне подовження, δ , %	Відносне звуження, ψ , %	Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см ²
65	20	230-232	528-542	61-63	69-70	182-184
80	20	231-239	517-527	61-71	71-73	176-197
Вимоги ТУ на товстостінні поковки	20	196	510	38	52	—
Вимоги ТУ на литі вироби завтовшки до 100 мм	20	196	441	25	32	60

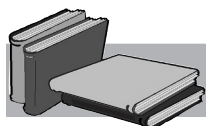


ЛІТЕРАТУРА

- Кукуй Д.М., Емельянович И.В., Петровский В.П., Ровин Л.Е., Ровин С.Л. Опыт утилизации металлической стружки. *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 47—50.
- Абрамов К.Б., Самуйлов С.Д., Фиглин Ю.А. Брикетирование титановой стружки под воздействием коротких импульсов электрического тока. *Цветные металлы*. 1998. № 12. С. 70—74.
- Шаповалов В.А., Биктагиров Ф.К., Бурнашев В.Р., Степаненко В.В. Электротермическое компактирование металлических материалов: возможности и перспективы. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 5. С. 5—10.
- Шаповалов В.А., Бурнашев В.Р., Биктагиров Ф.К., Игнатов А.П., Мьяница Г.Ф., Степаненко В.В., Брагин М.А., Пудиков В.Н., Подъячев Д.В., Ботвинко Д.В., Жиров Д.М., Гнатушенко А.В. ЭШП электродов, спрессованных из стружки аустенитных нержавеющей сталей. *Современная электрометаллургия*. 2011. № 4. С. 46—48.
- Спосіб отримання злитків зі стружки: пат. 54324 Україна, МПК С22В 9/00; заявл. 30.03.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.
- Кузьменко О.Г. Поведение частиц некомпактной присадки на границе воздух-шлак при электрошлаковой наплавке. *Автоматическая сварка*. 2004. № 10. С. 11—15.
- Кусков Ю.М., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. Применение стружки из стали 5ХНМ при электрошлаковой наплавке штампов в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*. 2019. № 6. С. 51—54. <https://doi.org/10.15407/as2019.06.08>
- Волков А.Е., Шалимов Ал. Г. Производство легированной стали методом электрошлакового переплава стружки. *Сталь*. 1989. № 12. С. 27—29.
- Молдован Г.А., Вишневский А.В., Заводовский В.К., Олейниченко В.И. Выплавка шихтовых слитков способом ЭШП из высоколегированной стали. *Проблемы специальной электрометаллургии*. 1975. № 1. С. 45—47.
- Кочкин С.В. Разработка технологии переработки металлической стружки методом электрошлакового переплава. *Современные научные исследования и инновации*. 2015. 6. Ч. 1. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/53989> (дата звернення: 10.02.2024).
- Биктагиров Ф.К. Поведение углерода при электрошлаковой обработке металлов. *Проблемы сварки, металлургии и родственных технологий*: сб. трудов VIII междуна. научн.-техн. конференции. Тбилиси: Модери, 2003. С. 255—265.
- Яковенко В.А., Лютый И.Ю., Латаш Ю.В. Исследование охлаждаемых электродов для электрошлакового процесса. *Проблемы спец. электрометаллургии*. 1985. № 1. С. 19—24.
- Satya Prasad V.V., Sambasiva Rao A., Prakash U., Ramakrishna Rao V., Krishna Rao P., Gupt Krihna M. Recycling of Superalloy Scrap through Electro Slag Remelting. *ISIJ International*. 1996. Vol. 36. Iss. 12. P. 1459—1464. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.1459>
- Кусков Ю.М., Рябцев И.А., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлосодержащих отходов. Киев: Интерсервис, 2020. 286 с.
- Альтман В.А., Орлов О.И. Способ выплавки высококачественных инструментальных сталей из отходов инструментального производства. *Электрометаллургия*. 1989. № 4. С. 19—21.

16. Гнатушенко А.В., Биктагіров Ф.К., Игнатов А.П., Грищенко Т.И. Качество кремниево-никелевой бронзы КН 1-3 электрошлаковой выплавки из некомпактных отходов. *Современная электрометаллургия*. 2009. № 4. С. 13—16.
17. Шаповалов В.А., Биктагіров Ф.К., Гнатушенко А.В., Игнатов А.П. Проблемы переработки некомпактных алюминиевых отходов (обзор). *Современная электрометаллургия*. 2005. № 2 (79). С. 18—22.
18. Гнатушенко А.В., Биктагіров Ф.К., Игнатов А.П. Электрошлаковая выплавка хромовой бронзы БрХ. *Современная электрометаллургия*. 2012. № 1. С. 16—18.
19. Биктагіров Ф.К., Веретільник О.В., Шаповалов В.О., Гнатушенко О.В., Игнатов А.П., Барабаш В.В. Порівняльні показники різних методів переробки стружки високолегованих сталей і сплавів. *Сучасна електрометалургія*. 2021. № 4. С. 11—15. <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.01>
20. Biktagirov F.K., Veretilnyk O.V., Shapovalov V.O., Hnatushenko O.V., Ignatov A.P., Barabash V.V. Electroslag Processing of High-Temperature Alloy Shavings. *AIST Transactions*. 2023. Vol. 20. No. 9. P. 200—203. <https://doi.org/10.30313/TR/09.23>

Надійшла 14.02.2024



REFERENCES

1. Kukuy, D.M., Emelyanovich, I.V., Petrovsky, V.P., Rovin, L.E., Rovin, S.L. (2009). Experience in metal shavings recycling. *Casting and metallurgy*, 1, 47-50 [in Russian].
2. Abramov, K.B., Samuilov, S.D., Figlin, Yu.A. (1998). Briquetting of titanium shavings under the influence of short pulses of electric current. *Non-ferrous metals*, 12, 70-74 [in Russian].
3. Shapovalov, V.A., Biktagirov, F.K., Burnashev, V.R., Stepanenko, V.V. (2011). Electrothermal compaction of metallic materials: opportunities and prospects. *Blank production in mechanical engineering*, 5, 5-10 [in Russian].
4. Shapovalov, V.A., Burnashev, V.R., Biktagirov, F.K., Ignatov, A.P., Myalnitsa, G.F., Stepanenko, V.V., Bragin, M.A., Pudikov, V.N., Podyachev, D.V., Botvinko, D.V., Zhirov, D.M., Gnatushenko, A.V. (2011). ESR of electrodes pressed from austenitic stainless steel shavings. *Electrometallurgy Today*, 4, 46-48 [in Russian].
5. Pat. 54324 UA, IPC C22B 9/00, Method for producing of ingots of cutting waste, Butko, V.I., publ. 10.11.2010 [in Ukrainian].
6. Kuzmenko, O.G. (2004). Behavior of non-compact additive particles at the air-slag interface during electroslag surfacing. *Automatic welding*, 10, 11-15 [in Russian].
7. Kuskov, Yu.M., Kuzmenko, O.G., Lentyugov, I.P. (2019). Application of chips of steel 5KhNM in electroslag surfacing of dies in current-conducting mold. *Automatic welding*, 6, 51-54. <https://doi.org/10.15407/as2019.06.08> [in Russian].
8. Volkov, A.E., Shalimov, A.I. (1989). Production of alloy steel by electroslag remelting of shavings. *Steel*, 12, 27-29 [in Russian].
9. Moldovan, G.A., Vishnevsky, A.V., Zavadovsky, V.K., Oleinichenko, V.I. (1975). Smelting of charge ingots using the ESR method from high-alloy steel. *Problems of special electrometallurgy*, 1, 45-47 [in Russian].
10. Kochkin, S.V. (2015). Development of technology of metal chips recycling by electroslag remelting method. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Innovatsii*, 6, Pt 1. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/53989> (Last accessed: 10.02.2024 [in Russian].
11. Biktagirov, F.K. (2003). Behavior of carbon in electroslag processing of metals. In: *Proc. of 8th Int. Sci.-Techn. Conf. on Problems of Welding, Metallurgy and Related Technologies* (Tbilisi, Modemi), 255-265 [in Russian].
12. Yakovenko, V.A., Lyuty, I.Yu., Latash, Yu.V. (1985). Study of cooled electrodes for the electroslag process. *Problems of special electrometallurgy*, 1, 19-24 [in Russian].
13. Satya Prasad, V.V., Sambasiva Rao, A., Prakash, U., Ramakrishna Rao, V., Krishna Rao, P., Gupt Krihna, M. (1996). Recycling of Superalloy Scrap through Electro Slag Remelting. *ISIJ International*, 36(12), 1459-1464. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.1459>
14. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentyugov, I.L. (2020). *Electroslag technologies for surfacing and recycling of metal and metal-containing waste*. Kyiv: Interservice, 286 p. [in Russian].
15. Altman, V.A., Orlov, O.I. (1989). Method for smelting high-quality tool steels from tool production waste. *Electrometallurgy*, 4, 19-21 [in Russian].
16. Hnatushenko, O.V., Biktagirov, F.K., Ignatov, A.P., Grishchenko, T.I. (2009). Quality of silicon-nickel bronze SiNi1-3 of electroslag smelting from non-compact waste. *Electrometallurgy Today*, 4, 13-16 [in Russian].
17. Shapovalov, V.O., Biktagirov, F.K., Hnatushenko, O.V., Ignatov, A.P. (2005). Problems of recycling of non-compact aluminium waste (review). *Electrometallurgy Today*, 2(79), 18-22 [in Russian].
18. Hnatushenko, O.V., Biktagirov, F.K., Ignatov, A.P. (2012). Electroslag smelting of chrome bronze BrCr. *Electrometallurgy Today*, 1, 16-18 [in Russian].
19. Biktagirov, F.K., Veretilnyk, O.V., Shapovalov, V.O., Hnatushenko, O.V., Ignatov, A.P., Barabash, V.V. (2021). Comparative indices of different methods of processing shavings of high-alloyed steels and alloys. *Electrometallurgy Today*, 4, 11-15. <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.01> [in Ukrainian].
20. Biktagirov, F.K., Veretilnyk, O.V., Shapovalov, V.O., Hnatushenko, O.V., Ignatov, A.P., Barabash, V.V. (2023). Electroslag Processing of High-Temperature Alloy Shavings. *AIST Transactions*, 20(9), 200-203. <https://doi.org/10.30313/TR/09.23>

Received 14.02.2024

Summary

O.V. Veretilnyk, Junior Researcher, e-mail: veretilnykolexandr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1056-0277>

F.K. Biktagirov, Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, e-mail: biktagirov@paton.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>, Web of Science ResearcherID: ENJ-2785-2022

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Analysis of the electroslag technologies usage for steel shavings recycling

The article is devoted to the problem of steel shavings processing. It is shown that electroslag melting has high refining capabilities for obtaining high-quality metal from highly contaminated chips. The peculiarities of various methods of electroslag melting of non-compact charge are considered. The prospect of non-briquetted shavings processing by the method of electroslag crucible melting (ESCM) was noted. When melting high-carbon steel, it is possible to use a non-consumable graphite electrode as a current conductor. When processing low- and medium-carbon steels and alloys, it is necessary to use a metal consumable electrode of the same grade of metal as the shavings as a current conductor. Research and experiments on joint melting of shavings and a consumable electrode made of heat-resistant alloys CrNi70WMoTiAlV, CrNi75MoNbTiAl and stainless steel Cr18Ni10Ti in an electric slag crucible furnace with a capacity of 120 kg were carried out. With the amount of shavings fed to the melting, 50-55 % of the total mass of the metal being remelted, and the furnace being fully loaded, the specific electricity consumption was from 0.48 to 0.55 kWh/kg, and the productivity was from 141.4 up to 170.5 kg/h. The content of alloying elements in heat-resistant alloys and stainless steel due to the adjustment of the slag composition and the possibility of doping while melting was within the standard composition for these metals. The high quality of the metal obtained from waste by the ESCM method is confirmed by the data of mechanical tests of the metal plates with a thickness of 65 and 80 mm made of Cr18Ni10Ti steel, which by all indicators exceed the requirements of the technical conditions for similar cast blanks. The performed analysis shows the prospects of using electroslag crucible melting for recycling steel shavings.

Keywords

Shavings, recycling, electroslag melting, consumable electrode, chemical composition, quality