

ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ МЕТАЛЕВОЇ СТРУЖКИ (Огляд)

О.В. Веретільник, Ф.К. Біктагіров, В.О. Шаповалов, О.В. Гнатушенко, А.П. Ігнатов

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено аналіз відомих способів і технологій переробки металевої стружки. Відзначено, що особливу цінність з точки зору ресурсозбереження представляє стружка, яка містить в своєму складі дорогі легуючі елементи — вольфрам, молібден, хром, нікель, ванадій, ніобій та інші. Для плавки традиційними способами в дугових сталеплавильних і індукційних печах стружку необхідно попередньо брикетувати. Однак є проблеми з рафінуванням металу при індукційній тигельній плавці і з істотними втратами легуючих елементів при дуговій. Серед технологій переробки некомпактованої сипучої стружки найбільшого поширення набули технології, засновані на електрошлаковому процесі, коли такий матеріал плавиться в шарі рідкого шлаку. При цьому в якості струмопідвідного електрода можуть служити як невитратні, переважно графітові, так і витратні металеві електроди. Зроблено висновок, що для рециклінгу стружки з низько- і середньовуглецевого легованого металу, в тому числі широко поширених нержавіючих і жароміцних сталей і сплавів на залізній і нікелевій основах, найбільш перспективною є комбінована плавка в електрошлаковій тигельній печі витратного електрода з одночасною подачею на плавку стружки в кількості до 70 % від загальної маси матеріалу, що переплавляється. Бібліогр. 27, рис. 5.

Ключові слова: стружка; рециклінг; переплав; електрошлаковий переплав; невитратний електрод; витратний електрод; електрошлакова тигельна плавка

На сьогоднішній день одним з важливих шляхів енерго- та ресурсозбереження є максимальне та ефективне залучення у виробництво різноманітних металевих відходів, що утворюються на стадіях виготовлення та обробки металопродукції. Металеві відходи бувають компактні (у вигляді кускового металу різних розмірів — лом) і некомпактні (дискретні — переважно у вигляді стружки). Технології переробки відходів кольорових, тугоплавких, високореакційних і деяких металів спеціального призначення мають свою специфіку і в даному огляді не розглядаються. Говорячи ж про відходи найпоширеніших конструкційних матеріалів (сталі і сплави на залізній та нікелевій основі), то вони у вигляді великого лому досить ефективно переробляються і повертаються у виробництво шляхом плавки в традиційних і широко застосовуваних у металургії дугових сталеплавильних (ДСП) і відкритих індукційних тигельних (ІТП) печах. Необхідно лише відзначити, що при плавці в індукційних печах бажано використовувати шихту без сторонніх домішок зважаючи на обмежені можливості рафінування металу. А для плавки в ДСП характерний підвищений вигар (втрати) легуючих елементів, особливо таких як хром, ванадій, ніобій, титан.

Що стосується некомпактних відходів, то серед них особливе місце займає стружка. Її на різних стадіях металообробки утворюється досить велика кількість [1]. Так коефіцієнт використання нержавіючих сталей на металообробних підприємствах нерідко складає 0,5...0,7, а залишок, здебільшого стружка, потрапляє у відходи [2]. Саме стружка представляє особливу складність для переробки, що пов'язано з її малою насипною щільністю, наявністю на поверхні залишків мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) і оксидної плівки, а також підвищеною забрудненістю сторонніми домішками [3].

Для переплаву в ДСП або ІТП стружку необхідно компактувати (брикетувати, пакетувати) для того, щоб уникнути підвищеного вигару в зоні дії дуги, підвищити ступінь заповнення плавильного простору печей і полегшити проведення процесу плавки. Залежно від складу і виду стружки можуть застосовуватися різні види компактування. В одних випадках достатньо холодного пресування з порівняно невеликими зусиллями, наприклад, при компактуванні стружки з малолегованої низько- і середньовуглецевої сталі. В інших випадках з метою отримання досить щільних брикетів необхідний підігрів матеріалу із застосуванням спеціальних видів нагріву для надання йому достатньої пластичності [4, 5].

Особливу цінність з точки зору переробки та ресурсозбереження являє стружка, яка містить в своєму складі дорогі легуючі елементи, такі як вольфрам, молібден, хром, нікель, ванадій, ніобій та інші. Але саме така стружка з високолегованих нержавіючих, швидкорізальних, жароміцних ста-

О.В. Веретільник — <https://orcid.org/0000-0002-1056-0277>, Ф.К. Біктагіров — <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>, В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, О.В. Гнатушенко — <https://orcid.org/0000-0002-0328-0875>, А.П. Ігнатов — <https://orcid.org/0000-0001-7015-5815>

лей і сплавів важко піддається брикетуванню. А застосування спеціальних способів компактування вимагає відповідного обладнання, додаткових матеріальних та енергетичних витрат і не завжди економічно доцільне. Проте і при використанні брикетованої стружки залишаються проблеми з рафінуванням металу при індукційній плавці і з істотними втратами легуючих елементів при електродуговій, навіть в печах постійного струму. У зв'язку з вище зазначеним ведуться розробки інших, більш ефективних, ніж плавка в ДСП і ІТП, способів і технологій переробки подібних некомпактних (дискретних) металевих відходів.

Для отримання зі стружки якісного металу необхідно при її переробці забезпечувати збереження вихідного хімічного складу і видалення з металу забруднюючих домішок, в тому числі газів. Добре відомі рафінуючі можливості таких способів плавки як електронно-променева (ЕПП), плазмово-дугова (ПДП) і електрошлакова (ЕШП). Що стосується ЕПП, то по причині високих витрат на проведення такої плавки виправданим може бути використання її для переробки лише відходів дорогих металів, таких як жароміцні сплави для лопаток турбін або сплави на нікелевій або кобальтовій основі. Та й то стосовно високоякісному лому з можливими добавками до нього невеликої кількості брикетованої стружки, що пройшла ретельне очищення від усіх забруднюючих домішок [6, 7].

Плазмово-дугова плавка, як і електронно-променева, проводиться в камері і тому для можливості подачі в плавильний простір може бути використана тільки брикетована стружка, в тому числі у вигляді електрода, що переплавляється. Дані про ПДП електродів діаметром 100 мм, отриманих шляхом компактування під струмом стружки нержавіючої сталі типу X18H10T і жароміцного сплаву EP609, свідчать про високу якість одержуваного металу [8, 9]. При цьому наголошується, що стружка не очищується від мастильно-охолоджувальної рідини. Але внаслідок вигорання залишків МОР при компактуванні з нагрівом, а також випаровування вуглецю у вигляді СО в процесі ПДП, вміст вуглецю в виплавленому металі був навіть нижче, ніж у вихідному. За хімічним складом, змістом газів і механічними властивостями отриманий з стружки матеріал відповідав технічним вимогам на метал вищевказаних марок.

ПДП стружки високолегованих сталей і сплавів дозволяє отримувати якісний метал, проте необхідність компактування стружки з виготовленням витратного електрода в сукупності з досить великими витратами на плазмову плавку істотно позначається на собівартості переробки. Крім того переплав

електрода діаметром 100 мм не дозволяє досягти високої продуктивності плавки. Отримання ж зі стружки шляхом компактування з нагрівом електродів більшого діаметру, наприклад 300...400 мм, вимагає створення складного обладнання і як у випадку з ЕПП розглянутий процес економічно може бути доцільним для рециклінгу некомпактних металевих відходів дорогих сталей і сплавів.

Витрати на електрошлаковий перепад завдяки простоті і надійності обладнання в кілька разів нижчі в порівнянні з електронно-променевою і плазмово-дуговою плавками. А рафінуючі можливості досить високі, особливо коли мова йде про видалення з металу неметалевих і забруднюючих домішок, що особливо важливо при плавці стружки. Результати ЕШП в кристалізаторі діаметром 170 мм отриманих компактуванням під струмом електродів діаметром 100 мм з вищезазначених сталей X18H10T і EP609 показали, що отриманий метал має якість, відповідну технічним умовам на метал даних марок [10]. Однак складність отримання щільного по всій довжині витратного електрода, тим більше порівняно великого діаметра, обмежує широке застосування даної технології переробки стружки з нержавіючої та жароміцної сталей. Також досить витратними є способи виготовлення зі стружки витратного електрода шляхом зварювання відносно невеликих по товщині щільних брикетів або замонолічування рідким металом стружки, покладеної в горизонтальну або вертикальну форму у вигляді електрода. Виправданою з економічної точки зору може бути лише виготовлення зі стружки, що піддається холодному компактуванню, досить довгомірних пресованих заготовок, з яких з мінімальною кількістю стиків звичайним або електрошлаковим зварюванням збирається витратний електрод для ЕШП.

З огляду на вищесказане, розробляються технології електрошлакової плавки металевих стружок без її попереднього брикетування. Ґрунтуються вони на тому, що кожна частка стружки має розвинену площу поверхні при порівняно невеликій її товщині. Це забезпечує швидке розплавлення стружки при попаданні в рідкий шлак, що має температуру вище температури плавлення металу. Математичне моделювання та натурні експерименти показали, що при характерних для електрошлакового процесу температурах шлаку 1650...1750 °С час плавлення стружки становить кілька секунд, а середня масова швидкість плавки не нижче, ніж швидкість плавки суцільного металевих електрода в печах ЕШП приблизно такого самого розміру [11, 12].

При електрошлаковій плавці некомпактної шихти у вигляді стружки для підтримки електрошлакового процесу необхідно від джерела живлення (трансформатора) до шлаку підводити електричний струм. Як струмопідвідний елемент найчастіше використовують графітований електрод і процес переплаву здійснюється так, як показано на рис. 1.

У літературі є відомості про переробку за вищенаведеною схемою стружки різних сталей. Так в роботі [13] наводиться приклад переробки стружки сталі Р6М5 в кристалізаторах діаметром 125 і 150 мм з використанням в якості струмопідводу графітових електродів діаметром 40 і 50 мм відповідно. Відзначається, що за хімічним складом виплавлений метал відповідає вимогам на сталь даної марки. Механічні властивості і стійкість фрез, виготовлених з отриманих заготовок, вищі в порівнянні з аналогічними показниками інструменту, виготовленого зі сталі промислового виробництва. Пояснюється це, на думку авторів, більш тонкою карбідною структурою металу зливків ЕШП і його рафінуванням при електрошлаковій плавці.

На Новокраматорському машинобудівному заводі опробовано технологію ЕШП стружки хромо-нікельвольфрамової сталі ЭИ961 [14]. При цьому в якості невитратного електроду використовували порожнисту стальну трубу з графітовим наконечником діаметром 250 мм. В електроді передбачено отвір, в якому розміщується лоток. Із бункера за допомогою шнекової подачі через лоток в середину електроду неперервно подавали розмільчену стружку з насипною масою 0,8...0,9 г/см³. Сама плавка відбувалася в водоохолоджуваному мідному кристалізаторі діаметром 305 мм. В якості шлакової складової використовували суміш АНФ-6 (65 %) і АН-291 (35 %). Такий флюс має більший електричний опір та забезпечує підвищення температури шлакової ванни на 50...70 °С і більш високу швидкість плавки (3,5...4,0 кг/хв) в порівнянні з плавкою з використанням тільки шлаку АНФ-6. Макроструктура подовжнього перерізу отриманих зливків характеризувалася відсутністю зональної ліквіації, S, P, шлакових включень та нерозплавленої стружки. Питомі витрати електроенергії склали 1500 кВт·год/т при питомих витратах флюсу 100 кг/т.

В роботі [15] пропонується технологія переробки металевої стружки, головна відмінність якої полягає у використанні порожнистого графітованого електроду, що дозволяє подавати стружку безпосередньо в центральну, найбільш розігріту зону шлакової ванни (рис. 2).

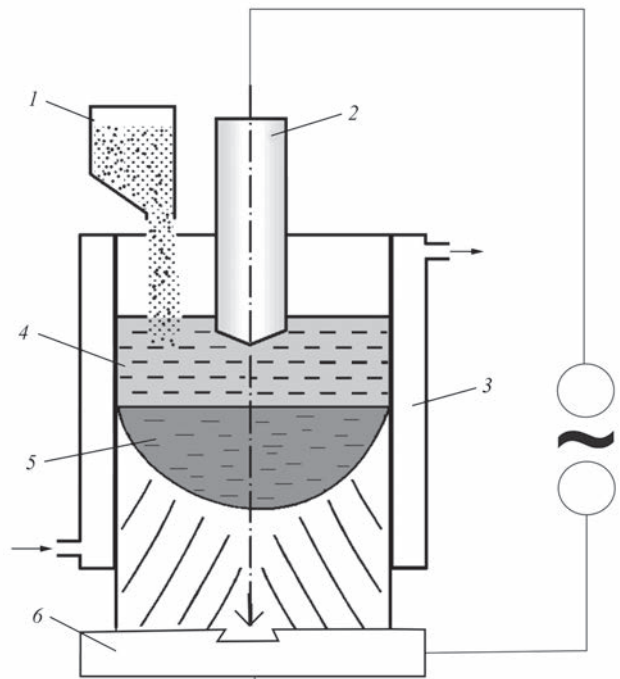


Рис. 1. Схема електрошлакової плавки стружки з використанням невитратного електроду в водоохолоджуваному кристалізаторі: 1 — бункер; 2 — невитратний електрод; 3 — водоохолоджуваний кристалізатор; 4 — шлакова ванна; 5 — металевая ванна; 6 — піддон

Підкреслюється, що запропонована технологічна схема має наступні переваги перед класичною багатостадійною схемою переплаву стружки з використанням дугової сталеплавильної печі: зменшений вигар металу і легуючих елементів; скорочену кількість стадій отримання кінцевого металу; зменшення витрат електричної енергії;

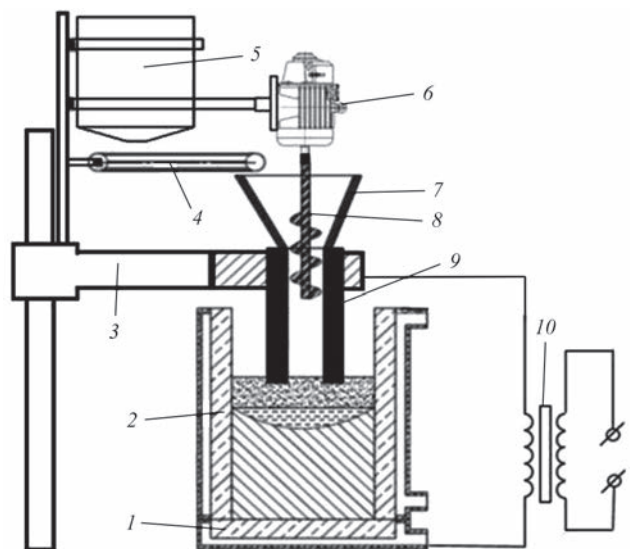


Рис. 2. Схема ЕШП некомпактних відходів з використанням полого невитратного електроду: 1 — піддон; 2 — кристалізатор; 3 — механізм переміщення електроду; 4 — дозатор; 5 — бункер для шихтових матеріалів; 6 — електропривід; 7 — воронка; 8 — шнековий живильник; 9 — полий невитратний електрод; 10 — джерело живлення

можливість переробки стружки безпосередньо на підприємствах, де вона утворюється.

Отримані зливки мали однорідну щільну структуру, включення у вигляді нерозплавлених частинок стружки або шлаку були відсутні, візуально вони не відрізнялися від злиwkів, отриманих переплавом звичайного сталевго електрода.

Вищенаведені приклади свідчать, що електрошлакова плавка з використанням невитратного струмопідвідного графітованого електрода є одним з ефективних способів переробки металевї стружки. Однак в цьому випадку існує небезпека науглецювання металу, яка багато в чому визначається складами стружки і шлаку, що переплавляють, і температурою останнього [16].

Це відзначається і в роботі [15], де підкреслюється, що одним з недоліків застосування невитратного графітованого електрода є збільшення вмісту вуглецю в металі зливка. Показано, що при переплаві стружки сталі 35ХГСА під шлаками АНФ-6, АН-29 і АНФ-32 вміст вуглецю виявився прийнятним тільки при використанні шлаку АНФ-32. В цьому випадку хімічний аналіз металу зливка показав його повну відповідність хімічному складу сталі 35ХГСА з вмістом вуглецю в межах вимог стандарту для даної марки сталі.

Тому при переробці стружки з середньо-, а тим більше низьковуглецевих сталей і сплавів застосування графітованого струмопідвода для здійснення електрошлакового процесу небажане, а найчастіше просто виключене. Що стосується використання замість них металевих водоохолоджуваних електродів, то мідні, молібденові або комбіновані (мідь–вольфрам) їх наконечники, зокрема

такі, які застосовувалися при переробці стружки з суперсплавів в роботі [17], в тій чи іншій мірі розчиняються в шлаку, забруднюючи метал, що переплавляється, особливо при досить високих температурах процесу, необхідних для ефективної плавки стружки. Тобто вони мають обмежений ресурс роботи і крім того на охолодження таких електродів витрачається до 40 % тепла, що виділяється в шлаку.

До різновиду електрошлакової плавки з невитратним водоохолоджуваним електродом можна віднести і процес ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі (СПК), де функцію невитратного електрода виконує струмопідвідна секція кристалізатора. У роботах [18–20] наводяться дані про використання такого кристалізатора для плавки в шарі шлаку різної некомпактної дискретної шихти — сталевї і мідної стружки, відходів швидкорізальних сталей, шлаків абразивної зачистки (рис. 3).

Перевагою переробки за такою схемою металевї стружки є наявність вільного дзеркала шлакової ванни, що полегшує подачу шихти на плавку, і відсутність колони для кріплення і переміщення струмопідвідного електрода. Однак такий кристалізатор набагато складніше і дорожче звичайного і плавка з його використанням характеризується підвищеною витратою електроенергії. Крім того в конструкції подібного кристалізатора з метою запобігання ерозії поверхні струмопровідної секції, що контактує зі шлаком, передбачається установка захисного графітового кільця. А це є джерелом небажаного науглецювання металу, що переплавляється. Особливістю електрошлакового процесу в струмопідвідному кристалізаторі є переважний нагрів периферії шлакової ванни. Внаслідок цього при збільшенні діаметра кристалізатора, наприклад для того, щоб збільшити продуктивність плавки, центральна область шлакової ванни матиме відносно низьку температуру, що ускладнює плавлення шихти в цій зоні.

Для виключення забруднення металу, що переплавляється з матеріалом струмопідвідного невитратного електрода, автори патенту [21] запропонували спосіб електрошлакової плавки некомпактних металевих відходів з використанням витратного електрода (рис. 4).

Витратний електрод може бути виготовлений різними способами в залежності від можливостей підприємства, де буде реалізовуватися подібна схема переробки металевї стружки. Наприклад, зварюванням відповідного за розмірами лому з металу тієї ж марки. Автори зазначеного патенту відзначають, що при переробці стружки швидкорізальної сталі Р6М5 кількість її становить до 60...70 % від

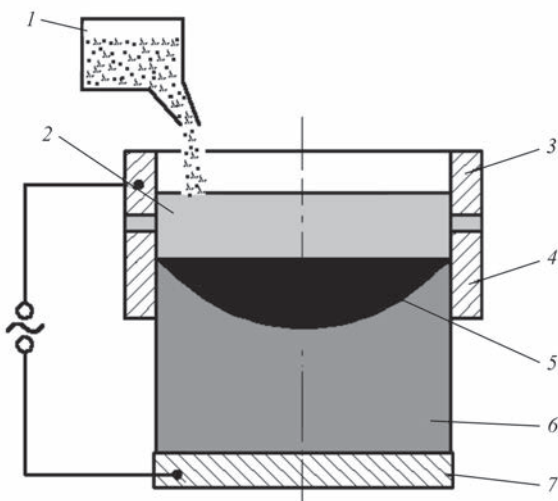


Рис. 3. Схема ЕШП некомпактних відходів у струмопідвідному кристалізаторі: 1 — бункер; 2 — шлакова ванна; 3 — струмопідвідна секція кристалізатора; 4 — формуюча секція кристалізатора; 5 — металева ванна; 6 — зливоч; 7 — піддон

загальної маси металу, що переплавляється. При цьому отримані зливки характеризуються відсутністю дефектів ліквацийного походження, щільною бездефектною макроструктурою. Тобто, запропонований спосіб ЕШП некомпактних відходів дозволяє отримувати інструментальну сталь, яка повністю відповідає всім вимогам, що пред'являються до серійної продукції.

Останній з розглянутих варіантів електрошлакової плавки некомпактних матеріалів є найбільш придатним для переробки металевої стружки з високолегованої нержавіючої сталі і різних жароміцних сплавів. Однак і ця технологія, як і всі попередні, що передбачають плавку в водоохолоджуваному кристалізаторі з отриманням зливки, мають ряд особливостей і обмежень. По-перше, не виключається можливість попадання в порівняно невелику за обсягом металеву ванну стружки, що не повністю розплавилась, яка може заносити з собою ще й частинки шлаку. Наприклад, внаслідок попадання в шихту окремих більших по товщині елементів або стружки, щільно скрученої у відносно великий клубок, або ж наявності сплєтених між собою фрагментів. По-друге, ускладнюється плавка металу, що має в своєму складі елементи, які мають високу спорідненість до кисню. Добре відомо, що в процесі ЕШП відбувається вигар титану і частково хрому, якими легують багато нержавіючих і жароміцних сталей. А при переробці стружки такої сталі втрати зазначених елементів зростають через високі температури шлаку, необхідні для швидкого плавлення некомпактної шихти. Долегування титаном (феротитаном) і хромом (ферохромом) в необхідній кількості по ходу плавки не гарантує рівномірного розподілу цих елементів по висоті і перетину виплавлених зливок. Більш того, існує небезпека локального скупчення таких добавок.

Крім металургійних є і технологічні складнощі плавки стружки за варіантом, показаному на рис. 4. Справа в тому, що при попаданні в плавильний простір стружка в тому чи іншому місці може одночасно торкатися електрода, що переплавляється, і стінки кристалізатора. Це призводить до виникнення мікродуг, що супроводжуються дестабілізацією електрошлакового процесу і небезпекою підвищеного зносу стінки кристалізатора аж до її пропалу. Необхідно також відзначити значні витрати води на охолодження кристалізатора, а також істотні втрати тепла з цією водою, що ведуть до збільшення питомих витрат електроенергії на плавку.

Всіх перерахованих вище недоліків і обмежень позбавлений процес електрошлакової плавки в футерованій ємності — електрошлакова тигельна

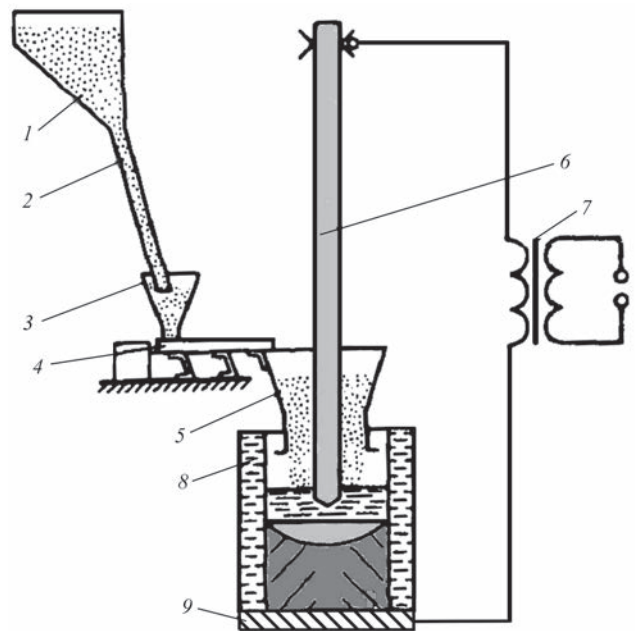


Рис. 4. Схема ЕШП некомпактних відходів з використанням витратного електрода: 1 — бункер с шихтою; 2 — жолоб; 3 — проміжна воронка; 4 — дозатор; 5 — воронка; 6 — витратний електрод; 7 — джерело живлення; 8 — кристалізатор; 9 — піддон

плавка (ЕШТП). Зазначена електрошлакова технологія знайшла широке поширення як раз для переробки різних металевих відходів. Так, із застосуванням графітованих електродів в якості струмопідводу успішно переплавляються відходи мідних і алюмінієвих сплавів у вигляді стружки, січки і дрібних шматків [22, 23] (рис. 5, а). Більш того, розроблені технології виплавки з мідних відходів мідних сплавів шляхом введення легуючих добавок в металеву ванну [24]. ЕШТП дозволяє здійснювати подібне легування практично без обмежень. Відзначається висока якість одержуваного при цьому металу, що досягається за рахунок його рафінування шлаком.

Використовувалася електрошлакова тигельна плавка авторами робіт [25, 26] і при переробці стружки з жароміцного сплаву ХН70ВМТЮФ (ЭИ617). Тигель футерувався хромомagneзитовою цеглою марки ПМ-1, використовувалася суміш шлаків АНФ-6 і АН-291, а в якості невитратного електрода служили вольфрамові, молибденові або графітові стрижні. У процесі плавки метал не розкислювали і не легували. Після закінчення плавки рідкий метал зливався в металевий кокіль. В роботах наводяться результати хімічного складу отриманого металу і його механічні властивості. При цьому не акцентується увага на зміну вмісту тих чи інших елементів, тому що виплавлені таким чином вилівки використовувалися в якості шихтових заготовок при подальшій плавці в індукційних печах. Проте з наведених даних впливає, що

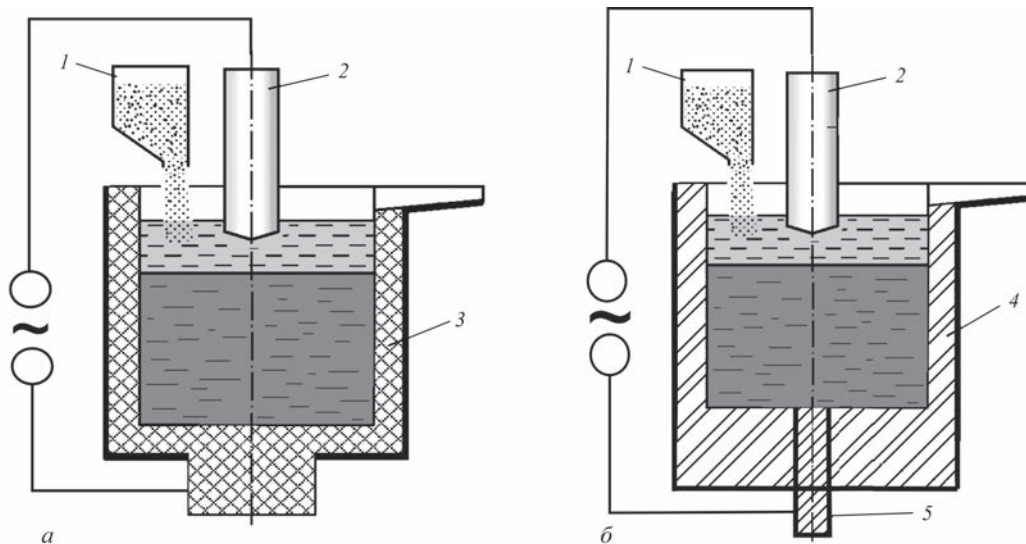


Рис. 5. Технологічна схема електрошлакової тигельної плавки в графітовій (а) та футерованій (б) ємностях: 1 — бункер; 2 — невитратний електрод; 3 — графітовий тигель; 4 — вогнетривкий тигель; 5 — струмопідвідна пластина

вміст титану в металі зменшується майже в два рази, алюмінію на 25...30, а хрому, вольфраму, молібдену і ванадію приблизно на 10 %. Тому в разі отримання при ЕШТП відразу марочного металу необхідно вживати заходів щодо зниження таких втрат при плавці, а при необхідності проводити долегування. Автори робіт стверджують, що така схема залучення у виробництво стружки дозволяє за рахунок зменшення втрат на окислювання (вигар) знизити на 15...20 % виробничі витрати.

Однак слід наголосити, що використання зазначених в роботі невитратних струмопідводів може привести, наприклад, до суттєвого науглецювання металу, яке не може бути усунуто при індукційній плавці, хіба що за рахунок розведення чистими по вуглецю шихтовими матеріалами. Тому, як відзначалося вище, для переплаву низько- і середньовуглецевих, а часом навіть високовуглецевих сталей електрошлаковий процес необхідно здійснювати витратним електродом.

Є відомості, що так чинять і на одному з підприємств України, де зі стружки штампової сталі 4Х5МФС шляхом холодного пресування отримують витратні електроди, які потім переplавляються в електрошлаковій тигельній печі. При цьому додатково стружку в процесі плавки не додають. У разі необхідності хімічний склад накопиченого в тиглі металу коригується присадками відповідних феросплавів і потім метал зливається в кокіль [27]. З отриманих заготовок виготовляються нові литі штампи, стійкість яких вище кованих, які поставляються спеціалізованими підприємствами.

Така схема переробки стружки можлива в разі отримання досить щільних і міцних електродів, що потрібно не тільки для запобігання їх поломки в процесі плавки, але і для забезпечення хорошої

провідності електричного струму. Якщо ж стружку складно скомпактувати з отриманням придатного для ЕШП електрода, а також якщо відсутня можливість або доцільність виготовлення такого електрода, процес її плавки може бути реалізований за схемою, яка показана на рис. 5, б, тільки з використанням в якості плавильної ємності не водоохолоджуваного кристалізатора, а тигельної печі.

Таким чином, виконаний аналіз способів і технологій переробки металевої стружки показує, що для рециклінгу низько- і середньовуглецевої легованої сталі, в тому числі нержавіючої та жароміцної, найбільш перспективною є комбінована плавка в електрошлаковій тигельній печі витратного електрода з одночасною подачею на плавку сипучої стружки. Залежно від умов і технологічних особливостей проведення подібної плавки кількість стружки, яку переplавляють, може становити до 70 % від загальної маси металу, що переplавляється. При цьому ефективно рафінування шлаком і можливість проведення активних металургійних операцій, в тому числі легування і розкислення, дозволяє отримувати метал високої якості.

Список літератури

1. Кукуй Д.М., Емельянович И.В., Петровский В.П. и др. (2009) Опыт утилизации металлической стружки. *Литье и металлургия*, 1, 47–50.
2. Шаповалов В.А., Бурнашев В.Р., Биктагиров Ф.К. и др. (2009) Переработка стружки жаропрочной стали ЭП609Ш способом компактирования под электрическим током с последующим электрошлаковым переplавом. *Современная электрометаллургия*, 3, 43–45.
3. Попов К.А. (2019) Утилизация и переработка металлической стружки. *Молодежная наука в развитии регионов*. Пермь, Издательство Перм. нац. исслед. политех. ун-та, 167–170.
4. Абрамов К.Б., Самуйлов С.Д., Фиглин Ю.А. (1998) Брикетирование титановой стружки под воздействием корот-

- ких импульсов электрического тока. *Цветные металлы*, **12**, 70–74.
5. Шаповалов В.А., Биктагиров Ф.К., Бурнашев В.Р. и др. (2011) Электротермическое компактирование металлических материалов: возможности и перспективы. *Заготовительные производства в машиностроении*, **5**, 5–10.
 6. Аникин Ю.Ф., Жежера А.Д., Ладохин С.В., Лапшук Т.В. (1998) Установка для совмещенной индукционной и электронно-лучевой плавки металлов и сплавов. *Металл и литье Украины*, **5–6**, 8–10.
 7. Аникин Ю.Ф., Ладохин С.В., Яковлев В.Т. (1998) Технологические параметры выплавки сложноголегированных никелевых сплавов в электронно-лучевых литейных установках. *Процессы литья*, **3–4**, 23–26.
 8. Шаповалов В.А., Биктагиров Ф.К., Бурнашев В.Р., Никитенко Ю.А. (2011) Плазменно-дуговой переплав заготовки, скомпактированной из стружки стали ЭП609-Ш. *Современная электрометаллургия*, **3**, 21–23.
 9. Бурнашев В.Р., Шаповалов В.А., Жиров Д.М. и др. (2014) Плазменно-дуговой переплав заготовок, скомпактированных из стружки аустенитных нержавеющей сталей. *Там же*, **1**, 37–40.
 10. Шаповалов В.А., Бурнашев В.Р., Биктагиров Ф.К. и др. (2011) ЭШП электродов, спрессованных из стружки аустенитных нержавеющей сталей. *Там же*, **4**, 46–48.
 11. Волков А.Е., Гохман Г.З., Шалимов Ал. Г. (1984) Плавление и рафинирование металла в перегретом шлаке некомпактных материалов. *Сталь*, **7**, 30–33.
 12. Кузьменко О.Г. (2004) Поведение частиц некомпактной присадки на границе воздух–шлак при электроразливочной наплавке. *Автоматическая сварка*, **10**, 11–15.
 13. Волков А.Е., Шалимов Ал. Г. (1989) Производство легированной стали методом электрошлакового переплава стружки. *Сталь*, **12**, 27–29.
 14. Молдован Г.А., Вишневецкий А.В., Заводовский В.К., Олейниченко В.И. (1975) Выплавка шихтовых слитков способом ЭШП из высоколегированной стали. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **1**, 45–47.
 15. Кочкин С.В. (2015) Разработка технологии переработки металлической стружки методом электрошлакового переплава. *Современные научные исследования и инновации*, **6**, Ч. 1. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/53989>.
 16. Биктагиров Ф.К. (2003) Поведение углерода при электрошлаковой обработке металлов. *Проблемы сварки, металлургии и родственных технологий. Сб. тр. VIII Международ. научно-технической конференции. Тбилиси, Модери*, сс. 255–265.
 17. Satya Prasad V.V., Sambasiva Rao A., Prakash U. et al. (1996) Recycling of superalloy scrap through electro slag remelting. *ISIJ International*, **1**, 1459–1464.
 18. Кусков Ю.М., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. (2019) Применение стружки из стали 5ХНМ при электрошлаковой наплавке штампов в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **6**, 44–50.
 19. Кусков Ю.М. (2001) Электрошлаковый переплав отходов различных производств с использованием нерасходуемого водоохлаждаемого электрода. *Электрометаллургия*, **2**, 28–28.
 20. Кусков Ю.М., Безкорвайный В.И., Ус В.И., Медовар Л.Б. (1992) Безэлектродная технология электрошлакового переплава медных отходов. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **3**, 29–32.
 21. Альтман В.А., Орлов О.И. (2010). *Способ выплавки высококачественных инструментальных сталей из отходов инструментального производства*. РФ, Пат. 2405843.
 22. Биктагиров Ф.К. (2003) Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщение 2. *Современная электрометаллургия*, **1**, 5–9.
 23. Цыганов А.С. (1961) *Производство вторичных цветных металлов*. Москва, Металлургиздат.
 24. Строганов Г.Б. (1971) *Общая металлургия и технология обработки цветных металлов*. Москва, Металлургиздат.
 25. Жеребцов С.Н. (2012) Применение технологии электрошлакового переплава стружки высоколегированных сталей и сплавов для получения мерной заготовки. *Электрометаллургия*, **4**, 32–34.
 26. Жеребцов С.Н., Романовский Ю.В. (2005) Электрошлаковый переплав стружки высоколегированных жаропрочных сплавов. *Омский вестник*, **2**, 108–109.
 27. Бутко В.И. (2010) *Спосіб отримання злитків зі стружки*. Україна, Пат. 54324.

References

1. Kukuj, D.M., Emelyanovich, I.V., Petrovsky, V.P. et al. (2009) Experience of recycling of metal chips. *Litio i Metallurgiya*, **1**, 47–50 [in Russian].
2. Shapovalov, V.A., Burnashev, V.R., Biktairov, F.K. et al. (2009) Recycling of chips of heat-resistant steel EP609-Sh using the method of compacting at electric current with subsequent electroslag remelting. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 43–45 [in Russian].
3. Popov, K.A. (2019) Utilization and recycling of metal chips. In: *Junior science in development of regions*. Perm, TSU [in Russian].
4. Abramov, K.B., Samujlov, S.D., Figlin, Yu.A. (1998) Briquetting of titanium chips under action of short pulses of electric current. *Tsvetnye Metally*, **12**, 70–74 [in Russian].
5. Shapovalov, V.A., Biktairov, F.K., Burnashev, V.R., et al. (2011) Electrothermal compacting of metal materials: Possibilities and prospects. *Zagotovitelnye Proizvodstva v Mashinostroenii*, **5**, 5–10 [in Russian].
6. Anikin, Yu.F., Zhezhera, A.D., Ladokhin, S.V., Lapshuk, T.V. (1998) Installation for combined induction and electron beam melting of metals and alloys. *Metall i Litio Ukrainy*, **5–6**, 8–10 [in Russian].
7. Anikin, Yu.F., Ladokhin, S.V., Yakovlev, V.T. (1998) Technological parameters of melting of complex alloyed nickel alloys in electron beam casting installations. *Protsessy Litya*, **3–4**, 23–26 [in Russian].
8. Shapovalov, V.A., Biktairov, F.K., Burnashev, V.R., Nikitenko, Yu.A. (2011) Plasma-arc remelting of billet, compacted of EP609-Sh steel chips. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 21–23 [in Russian].
9. Burnashev, V.R., Shapovalov, V.A., Zhiron, D.M. et al. (2014) Plasma-arc remelting of billets compacted from chips of austenitic stainless steels. *Ibid.*, **1**, 37–40 [in Russian].
10. Shapovalov, V.A., Burnashev, V.R., Biktairov, F.K. et al. (2011) ESR of electrodes compacted of austenite stainless steel chips. *Ibid.*, **4**, 46–48 [in Russian].
11. Volkov, A.E., Gokhman, G.Z., Shalimov, Al.G. (1984) Melting and refining of metal in overheated slag of noncompact materials. *Stal*, **7**, 30–33 [in Russian].
12. Kuzmenko, O.G. (2004) Behavior of particles of a nocompact filler at air-slag interface in electroslag hardfacing. *The Paton Welding J.*, **10**, 8–11.
13. Volkov, A.E., Shalimov, Al.G. (1989) Production of alloyed steel by method of electroslag remelting of chips. *Stal*, **12**, 27–29 [in Russian].

14. Moldovan, G.A., Vishnevsky, A.V., Zavadovsky, V.K., Olejnichenko, V.I. (1975) Melting of charge ingots by ESR method from high-alloyed steel. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 45–47 [in Russian].
15. 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> [in Russian].
16. 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.
17. Satya Prasad, V.V., Sambasiva Rao, A., Prakash, U. et al. (1996) Recycling of superalloy scrap through electroslag remelting. *ISIJ Intern.*, **1**, 1459–1464.
18. Kuskov, Yu.M., Kuzmenko, O.G., Lentuygov, I.P. (2019) Application of chips of steel 5KhNM in electroslag surfacing of dies in current-conducting mold. *The Paton Welding J.*, **6**, 43–45.
19. Kuskov, Yu.M. (2001) Electroslag remelting of wastes of different productions using nonconsumable water-cooled electrode. *Elektrometallurgiya*, **2**, 28–28 [in Russian].
20. Kuskov, Yu.M., Bezkorovajny, V.I., Us, V.I., Medovar, L.B. (1992) Electrodeless technology of electroslag remelting of copper wastes. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 29–32 [in Russian].
21. Altman, V.A., Orlov, O.I. (2010) *Method of melting of high-quality tool steels from wastes of tool production*. RF Pat. 2405843 [in Russian].
22. Biktagirov, F.K. (2003) Application of non-consumable electrode electroslag process for melting, refining and treatment of metals. Report 2. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 4–8.
23. Tsyganov, A.S. (1961) Production of secondary nonferrous metals. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
24. Stroganov, G.B. (1971) *General metallurgy and technology of nonferrous metals processing*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
25. Zherebtsov, S.N. (2012) Application of technology of electroslag remelting high-alloyed steels and alloys chips for producing of measuring billet. *Elektrometallurgiya*, **4**, 32–34 [in Russian].
26. Zherebtsov, S.N., Romanovsky, Yu.V. (2005) Electroslag remelting of chips of high-alloyed heat-resistant alloys. *Omskij Vestnik*, **2**, 108–109 [in Russian].
27. Butko, V.I. (2010) *Method of producing of ingots from chips*. Ukraine Pat. 54324 [in Ukrainian].

TECHNOLOGY OF PROCESSING METAL CHIPS (Review)

O.V. Veretilnik, F.K. Biktagirov, V.O. Shapovalov, O.V. Gnatushenko, A.P. Ignatov
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Analysis of the known methods and technologies of processing metal chips was performed. It is noted that chips containing expensive alloying elements, namely tungsten, molybdenum, chromium, nickel, vanadium, niobium, etc., are the most valuable in terms of resource conservation. For melting by traditional methods in arc steel and induction furnaces the chips have to be briquetted first. However, there are problems with metal refining in induction crucible melting and with significant loss of alloying elements in arc melting. Technologies based on the electroslag process, when such material is melted in a layer of liquid slag, became the most widely accepted among those for processing uncompacted chips. Here both the nonconsumable, predominantly graphite, and consumable metal electrodes can be used as current-supplying electrode. A conclusion is made that combined melting of a consumable electrode in an electroslag crucible furnace with simultaneous feeding of chips for melting in the quantity of 70 % of the mass of material being remelted, is the most promising for recycling chips from low- and medium-carbon alloyed metal, including widely applied stainless and high-temperature steels and alloys on iron and nickel base. Ref. 27, Fig. 5.

Key words: chips; recycling; remelting; electroslag remelting; nonconsumable electrode; consumable electrode; electroslag crucible melting

Надійшла до редакції 20.02.2020



Zaporozhye Industrial Forum

08–10 September, 2020, Zaporozhye, Ukraine

26th International Specialized Exhibition of Industrial Solutions

<https://expo.zp.ua/zpf/>

INTERNATIONAL CONFERENCES



X International Conference
«Mathematical Modeling
and Information Technologies in Welding
and Related Processes»

Hotel «Arkadia»,
14–18 September, 2020,
Odessa, Ukraine

<https://pwi-scientists.com/eng/mmi2020>

XXIII International Conference
«Non-Destructive Testing
and Monitoring
of Technical Condition»

Hotel «Arkadia»,
14–18 September, 2020,
Odessa, Ukraine

<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2020>

