

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СТРУЖКИ ДЛЯ ВИПЛАВКИ І РОЗКИСНЕННЯ СТАЛІ ШХ15 В ІНДУКЦІЙНІЙ ПЕЧІ

В.О. Шаповалов, В.Р. Бурнашев, О.В. Гнатушенко, В.В. Барабаш, Д.М. Жиров

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [shapovalov@paton.kiev.ua](mailto:shapovalov@paton.kiev.ua)

Розглянуто можливості переробки стружки в тигельній індукційній печі. Для скорочення часу переплаву стружки сталі ШХ15 і алюмінію в тигельній індукційній печі її пресували в брикети діаметром 100 мм та переплавили в тигельній індукційній печі. Досліджено поведінку газових домішок під час виплавки та розкиснення. Показано, що в умовах тигельної індукційної печі можливо отримати метал як для безпосереднього виготовлення виробів, так і отримання витратних електродів. Бібліорг. 10, табл. 2, рис. 3.

*Ключові слова:* тигельна індукційна піч, сталь ШХ15, пресування, брикети, алюміній, розкиснення

**Вступ.** Важливим резервом економії металу є використання відходів металообробки як сировини для металургійної промисловості. При належній переробці стружки можна повернути у виробництво значну кількість металу.

Основним способом утилізації металевої стружки у теперішній час є металургійний переплав непідготовленої стружки, що визначається порівняно низькою рентабельністю. При переплаві сталевих стружок втрати на вигорання становлять 15...30 %, при цьому вигорають як залізо, так і легуючі елементи [1, 2]. Але вирішення проблеми утилізації стружки актуальне не тільки для сталі, а і для більшості металів і сплавів, особливо для легких металів, наприклад, алюмінію. Переплав алюмінієвої стружки пов'язаний з великими втратами металу на вигорання під час нагрівання та розплавлення. Зважаючи на невідворотне забруднення алюмінієвих відходів, вторинний алюміній доцільно використовувати не як сировину для алюмінієвих виробів, а для розкиснення та мікролегування сталей і сплавів [3].

Істотного зменшення втрат на вигорання металів можна досягти завдяки утилізації відходів механічної обробки в знежиреному та компактному вигляді. Іншими перевагами такого методу утилізації є зниження втрати та засміченості стружки при її транспортуванні та зберіганні, значне зменшення витрат на транспортування відходів, оскільки їх переплавлення може бути здійснено на тому ж підприємстві, де вони утворюються.

Аналіз способів і пристроїв з підготовки металевої стружки до переплавлення показує, що існуючі методи ще недостатньо ефективні [4–6]. Ключовим елементом у процесі підготовки є операція брикетування. В існуючих способах брикетуван-

ня використовують великі зусилля пресування (~300...400 МПа), іноді в поєднанні з нагріванням стружки, що дозволяє одержати брикети щільністю 50...70 % від щільності переплавленого металу [7]. Однак навіть за такої щільності брикету його міцність недостатня.

Тому завданням цього дослідження було підвищення ефективності використання алюмінієвих відходів у вигляді стружки для розкиснення та мікролегування сталей ШХ15, а також можливість заміни плавеного фероалюмінію ФА-20 на пресовані брикети відповідного складу.

**Обладнання і матеріали.** В ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України розроблено спосіб і створено обладнання для гарячого пресування (компактування) дрібних та середніх фракцій металевих матеріалів. Створене обладнання дозволяє компактувати стружку, крупу, гранули, порошки в електроди діаметром 100 мм та довжиною до 1000 мм або у таблетки діаметром 100...200 мм при щільності 60...70 % від щільності плавеного матеріалу. Компактування можливе у вакуумі, повітрі і в інертній атмосфері [8]. Електроди і таблетки мають високу механічну міцність та малий відсоток осипу.

Компактування таблеток і електродів із стружки відбувається з використанням матриці спеціальної конструкції. Установка для компактування [9] оснащена механізмами пресування та витягування напруженого електрода. Струм підводиться безпосередньо до бічної поверхні заготовки або до затравки (у стартовий період). Процес проводиться за відносно невеликих зусиль пресування (~2,5 МПа). Це значно знижує вартість устаткування.

Як матеріал для компактування використовували стружку сталі ШХ15 і стружку алюмінію та алюмінієвих сплавів.

В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, В.Р. Бурнашев — <https://orcid.org/0000-0001-6807-3810>, О.В. Гнатушенко — <https://orcid.org/0000-0002-0328-0875>, В.В. Барабаш — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>, Д.М. Жиров — <http://orcid.org/0000-0002-9435-8075>



Рис. 1. Зовнішній вигляд брикетів

На наступній стадії отримані брикети використувалися при виплавці та розкисненні сталі ШХ15 в індукційній печі тигельного типу ємністю 35 кг.

**Методика проведення експериментів.** На першому етапі досліджень було одержано брикети стружки сталі ШХ15 діаметром 100 мм і висотою 30...50 мм методом компактування.

Для цього через сталеву або суміш сталеві та алюмінієвої стружки, що знаходяться у матриці, пропускали струм силою 7 кА при напрузі 7,5 В. При проходженні струму джоулеве тепло нагріває метал в місцях його контакту до температури плавлення і розміщує стружку. У цей момент відбувається пресування брикету. Щільність брикету сягає 60...70 % від щільності металу (рис. 1).

На другому етапі досліджень брикети зі сталі ШХ15 (100 %) завантажували в індукційну тигельну піч.

Після розплавлення брикетів у ванну рідкого металу вводили брикети, що складаються зі стружки сталі ШХ15 (80 %) і алюмінію (20 %) для остаточного розкиснення сталі. Щільність брикету становила 45 % від щільності сталі. Така щільність брикету технологічно прийнятна для розкиснення рідкої сталі.

Після введення в рідку ванну брикету з алюмінієм під час плавки відбиралися проби металу кожні 3 хв. Це робилося для того, щоб зафіксувати поведінку газових домішок та алюмінію у процесі подальшої плавки.

Паралельно з виконаними дослідженнями було проведено експерименти за тією ж схемою відбору проб, але як розкиснювач був використаний стан-

дартний сплавлений фероалюміній марки ФА-20 (табл. 1, плавка 2).

**Методи дослідження якості одержаного металу.** Визначення масових часток кремнію, марганцю, хрому, міді, нікелю, алюмінію виконано методом спектрального аналізу на квантиметрі ДФС-10 (відносна похибка 2 %), масову частку вуглецю визначено кулонометричним методом на АН-160 (абсолютна похибка  $5 \cdot 10^{-4}$  %), вміст кисню, азоту та водню — методом вакуумного плавлення на газоаналізаторах фірми «Лесо» (RO-16, TN-14, TC-30) та фірми Heraeus — UN8 (відносна похибка  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ ).

Результати дослідження хімічного складу виплавлених зливок наведено у табл. 1.

Для оцінки забрудненості неметалевими включеннями було відібрано зразки від головної та донної частини зливка, оцінку проведено на мікроскопі «Neophot-32». Для визначення об'ємної частки неметалевих включень застосовано автоматизований комплексний аналіз переглядом великої кількості полів зору. Твердість за Вікерсом виміряно на твердомірі М400 фірми «Лесо» при навантаженні 100 кгс.

В результаті проведених експериментів було одержано два зливки сталі ШХ15 вагою 15 кг кожен. Отримані зливки прокатували на квадрат 40 мм. З них було виготовлено зразки для механічних випробувань та металографічних досліджень [10].

Результати механічних досліджень наведено у табл. 2.

**Обговорення отриманих результатів.** За даними хімічного аналізу, наведеними у табл. 1, видно, що хімічний склад виплавлених зливок (рис. 2)

Таблиця 1. Хімічний аналіз виплавлених зливок сталі ШХ15, мас. %

Зразок	Вміст основних легуючих елементів				Вміст домішок, не більше							Вміст газів	
	C	Mn	Si	Cr	S	P	Al	Ni	Cu	Ni+Cu	Ti	[O]	[N]
ГОСТ 801–78	0,95...1,1	0,2...0,4	0,17...0,37	1,3...1,65	0,02	0,027	–	0,30	0,25	0,50	0,1	–	–
Вих.	1,0	0,42	0,28	1,65	0,01	0,008	–	0,09	–	0,09	–	0,0076	0,015
1	→–	0,23	0,20	1,45	0,007	0,002	–	0,02	–	0,04	–	0,008	0,07
2 (ІТП)	1,05	0,37	0,28	1,35	0,01	0,008	0,01	0,09	–	0,09	–	0,0075	0,0148
3 (ІТП)	1,02	0,25	0,25	→–	0,008	→–	0,068	0,07	–	0,08	–	0,009	0,09

Примітка. 1 — плавка ПДП [8]; 2 — плавка брикетів Fe–Al; 3 — ФА-20.

**Таблиця 2.** Механічні властивості сталі ШХ15, виплавленої різними способами спеціальної електрометалургії

Спосіб виплавки	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Примітка
ЕДП	562,9	777,26	17,252	40,063	Плавка з флюсом
ПДП	637,86	857,53	14,46	29,786	Плавка без флюса
ПДП	698,13	905,5	12,23	24,69	Плавка з флюсом
ІТП	544,0	768,1	11,34	19,82	Плавка без флюса

*Примітка.* ЕДП — електродугова плавка; ПДП — плазово-дугова плавка; ІТП — індукційна тигельна плавка.



Рис. 2. Зливкок зі сталі ШХ-15

відповідає складу сталі ШХ15 (ГОСТ 801–78). Слід зазначити, що у зразках сталі, виплавленої з пресованої стружки, спостерігається зниження концентрації таких елементів як кремній і хром. У процесі переплаву відбувається підвищення вмісту кисню і азоту. Це пояснюється тим, що плавки проводили у відкритій тигельній печі.

На рис. 3 показано поведінку газових домішок у процесі розкиснення сталі ШХ15. Встановлено, що при введенні в сталь 0,2 % плавленого ФА-20 або пресованих брикетів (20 % алюмінієвої стружки і 80 % стружки ШХ15) спостерігається незначне підвищення вмісту азоту та зниження вмісту кисню на 70 %. При цьому залишковий вміст алюмінію в металі, розкисненому спресованими брикетами, становить 0,01 %, що трохи вище, ніж у металі, розкисненому ФА-20 (0,008 %). Хоча характер кінетичних кривих поведінки азоту і кисню практично ідентичний в обох плавках.

З наведених даних у табл. 2 видно, що механічні властивості сталі ШХ15, виплавленої способом індукційної тигельної плавки спресованих зі стружки брикетів, трохи нижче за механічні властивості сталі, виплавленої іншими способами спецеелектрометалургії, але знаходяться на досить високому рівні.

У досліджуваних зразках спостерігаються такі неметалеві включення: точкові оксиди, сульфід, окисульфід, рядки силікатів, карбонітриди та одиночні силікати. Забрудненість неметалевими включеннями відповідає балу 1 згідно з ГОСТ 1778–70.

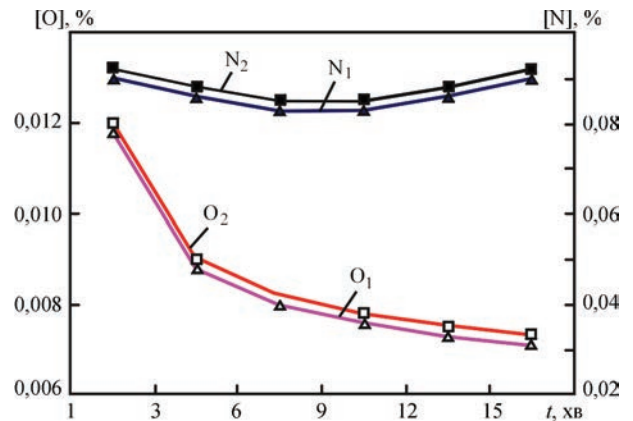


Рис. 3. Поведінка кисню і азоту при розкисненні сталі ШХ15 стандартним фероалюмінієм та пресованими брикетами: O<sub>1</sub> — поведінка кисню під час першої плавки; N<sub>1</sub> — поведінка азоту під час першої плавки; O<sub>2</sub> — поведінка кисню під час другої плавки; N<sub>2</sub> — поведінка азоту під час другої плавки

Твердість за Вікерсом складає 283 кгс/мм<sup>2</sup>. Об’ємна частка неметалевих включень — 0,28 %.

Проведені дослідження показали можливість переробки брикетів зі стружки сталі ШХ15 з використанням брикетів з цієї ж сталі з додаванням алюмінієвої стружки для мікролегування і розкиснення алюмінієм в умовах тигельної індукційної плавки. У подальших дослідженнях доречно перевірити можливість виплавки сталей з більшим вмістом легуючих елементів, таких як хром, молібден, ніобій та ін., з використанням брикетів з метою мікролегування та долегування сталі. При цьому основа брикетів для легування має складатися зі стружки тієї ж сталі, що виплавляється.

Дослідження якості металу зливоків сталі ШХ15, отриманих із спресованих зі стружки брикетів, дозволяють зробити висновок про можливість їх використання у якості заготовок для подальшого переплаву способами спецеелектрометалургії.

### Висновки

1. Встановлено можливість переробки стружки сталі ШХ15 шляхом пресування стружки у брикети з подальшим мікролегуванням та розкисненням алюмінієм, доданим у брикети, в умовах тигельної індукційної плавки.

2. Кінетичні криві поведінки кисню та азоту при розкисненні брикетами з алюмінієм і плавленим фероалюмінієм ідентичні, залишковий вміст алюмінію становить 0,1...0,08 %.

3. Показано доцільність досліджень можливості застосування брикетів з такими елементами як хром, молібден, ніобій та ін. для легування і долегування при виплавці високолегованих сталей.

4. Визначено, що в процесі переплаву брикетів зі стружки сталі ШХ15 можливе одержання заготовок для подальшого переплаву способами спецелектрометалургії.

### Список літератури

1. Кипарисов С.С., Падалко О.В. (1979) Проблемы получения порошков и изделий из них с использованием в качестве сырья стружковых отходов. *Порошковая металлургия*, **9**, 56–65.
2. Носков В.А., Чернышов А.В., Кармазина В.В. (2008) Исследование параметров процесса пакетирования металлической стружки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **4**, 125–127.
3. Нікітін В.В. (2002) Створення та дослідження технології брикетування порошкових відходів алюмінієвого виробництва: Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 05.03.05. Донецьк.
4. Веретільник О.В., Біктагіров Ф.К., Шаповалов В.О. та ін. (2020) Технології переробки металеві стружки (Огляд). *Сучасна електрометалургія*, **2**, 31–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.06>
5. Жеребцов С.Н. (2012) Применение технологии электрошлакового переплава стружки высоколегированных сталей и сплавов для получения мерной заготовки. *Электрометаллургия*, **4**, 32–34.
6. (2010) Спосіб отримання злитків зі стружки. Україна, Пат. 54324, C22B9/00. № u201003645.
7. Абрамова К.Б., Самуилов С.Д. (2005) Метод брикетирования металлической стружки. *Рынок вторичных металлов*, **28(2)**, 50–54.
8. (2007) Спосіб компактування металеві шихти. Україна, Пат. 79977, C22B1/248. № a200501214.

9. Шаповалов В.А., Бурнашев В.Р., Биктагіров Ф.К. и др. (2009) Переработка стружки жаропрочной стали ЭП609-Ш способом компактирования под электрическим током с последующим электрошлаковым переплавом. *Современная электрометаллургия*, **3**, 43–45.
10. Шаповалов В.О., Бурнашев В.Р., Грищенко Т.І. та ін. (2021) Плазмово-дуговий переплав шарикопідшипникової сталі ШХ15. *Сучасна електрометалургія*, **1**, 35–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.04>

### References

1. Kiparisov, S.S., Padalko, O.V. (1979) Problems of producing of powders and products from them using chip waste as raw material. *Poroshk. Metallurgiya*, **9**, 56–65 [in Russian].
2. Noskov, V.A., Chernyshov, A.V., Karmazyna, V.V. (2008) Investigation of the parameters of the metal shaving packaging process. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **4**, 125–127 [in Russian].
3. Nikitin, V.V. *Creation and research of the technology of briquetting powder waste from aluminum production*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Donetsk, 2002.
4. Veretilnyk, O.V., Biktahirov, F.K., Shapovalov, V.O. et al. (2020) Metal shaving processing technologies (Review). *Suchasna Elektrometalurhiya*, **2**, 31–38 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.06>
5. Zherebtsov, S.N. (2012) Application of technology of electroslag remelting of shavings of high-alloyed steels and alloys to obtain a dimensional workpiece. *Elektrometallurgiya*, **4**, 32–34 [in Russian].
6. (2010) *Method for producing of ingots of cutting waste*. Ukraine, Pat. 54324, Int. Cl. C22B9/00, No u201003645.
7. Abramova, K.B., Samuylov, S.D. (2005) Method of briquetting metal shavings. *Rynok Vtorichnykh Metallov*, **28(2)**, 50–54 [in Russian].
8. (2007) *Method for metal charge compacting*. Ukraine, Pat. 79977, Int. Cl. C22B1/248, No a200501214.
9. Shapovalov, V.A., Burnashev, V.R., Biktahirov, 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.
10. Shapovalov, V.A., Burnashev, V.R., Grishchenko, T.I. et al. (2021) Plasma-arc remelting of ShKh15 bearing steel. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **1**, 35–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.04>

## THE EFFICIENCY OF USING CHIPS FOR MELTING AND DEOXIDIZING ShKh15 STEEL IN AN INDUCTION FURNACE

V.O. Shapovalov, V.R. Burnashev, O.V. Hnatushenko, V.V. Barabash, D.M. Zhyrov  
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: [shapovalov@paton.kiev.ua](mailto:shapovalov@paton.kiev.ua)

The possibilities of recycling chips in a crucible induction furnace (CIF) are examined. To reduce the remelting time of ShKh15 steel and aluminum chips, they were pressed into briquettes with a diameter of 100 mm and remelted in the CIF. The behavior of gaseous impurities during melting and deoxidation was studied. It was shown that under CIF furnace conditions, it is possible to obtain metal suitable for both direct manufacturing of products and for the production of consumable electrodes. 10 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

*Keywords: crucible induction furnace, ShKh15 steel, pressing, briquettes, aluminum, deoxidation*

Отримано 31.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 08.01.2025

Прийнято 26.02.2025