

# ПОРІВНЯЛЬНІ ПОКАЗНИКИ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПЕРЕРОБКИ СТРУЖКИ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ

**Ф.К. Біктагіров, О.В. Веретільник, В.О. Шаповалов,  
О.В. Гнатушенко, А.П. Ігнатів, В.В. Барабаш**

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

Виконано експерименти з переробки в індукційній та електрошлаковій печах компактованої і некомпактованої стружки нержавіючої сталі Х18Н10Т і жароміцних сплавів 07Х12НМБФ (ЭП609) і ХН70ВМТЮФ (ЭИ617). Показано, що найкращою є технологія спільного переплаву в електрошлаковій тигельній печі витратного електрода з кускових відходів і стружки. В цьому випадку при плавці в печі ємністю 120 кг при кількості стружки, що подається на плавку, 45...55 % від загальної маси плавки питомі витрати електроенергії становлять 0,55...0,65 кВт·год/кг, продуктивність — 130...160 кг/год, а втрати на вигар — не більше 1...2 %. При електрошлаковій тигельній плавці є можливість активно проводити металургійні операції, такі як рафінування, модифікування, легування і розкислення, що дозволяє отримувати метал високої якості. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 3.

*Ключові слова:* стружка; переробка; індукційна плавка; електрошлакова плавка; електроенергія; продуктивність; якість

На багатьох підприємствах у процесі виготовлення різних виробів при механічній обробці чорнових заготовок утворюється велика кількість металевієї стружки. Найчастіше стружка здається (продається) як низькосортні металеві відходи і надходить на спеціалізовані підприємства, що мають відповідне обладнання для переробки подібної сировини. У загальній масі стружки різних видів окрему групу складає стружка легованих і високолегованих сталей та сплавів, таких як інструментальна, штампова, нержавіюча, жароміцна та ін. При перепаві такої стружки важливо максимально зберегти цінні легуючі елементи і отримати метал, придатний для повторного використання.

У якості плавильного устаткування для виплавки легованих сталей зазвичай використовуються дугові сталеплавильні (ДСП) та індукційні

печі. Через підвищене вигорання металу в ДСП, навіть в печах, що працюють на постійному струмі, найбільш придатними для переробки подібної стружки є індукційні печі, а також установки електрошлакового перепаву. Перспективність використання останніх для плавки некомпактованої шихти відзначається багатьма дослідниками [1–4].

З метою оцінки можливостей різних видів перепаву стружки високолегованих жароміцних сплавів і нержавіючої сталі були проведені дослідження і експерименти за технологічними варіантами, опис яких наведено в табл. 1 і на рис. 1.

Індукційну тигельну плавку (ІТП) здійснювали в печі ємністю 30 кг, а електрошлакову (ЕШП) — в кристалізаторі діаметром 170 мм з отриманням зливків масою 35...60 кг та тигельній печі (ЕШТП), в якій маса металу, що перепалявся, становила від

**Таблиця 1.** Способи переробки стружки

Плавка	Марка металу	Початковий матеріал	Маса плавки, кг	Вид плавки
1	07Х12НМБФ (ЭП609)	Компактований електрод	35...42	ЕШП
2	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	—>—	38...40	—>—
3	07Х12НМБФ (ЭП609)	Компактовані брикети	29...31	ІТП
4	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	Стружка	—>—	—>—
5	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	Зливки ІТП зі стружки	—>—	—>—
6	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	—>—	59...60	ЕШТП
7	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	Зливки ІТП зі стружки з додаванням стружки	60...120	—>—
8	Х18Н10Т	Компактований електрод	35...62	ЕШП
9	Х18Н10Т	Електрод із кускового брухту	60...90	ЕШТП
10	Х18Н10Т	Електрод із кускового брухту з додаванням стружки	70...120	—>—

Ф.К. Біктагіров — <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>, О.В. Гнатушенко — <https://orcid.org/0000-0002-0328-0875>,  
О.В. Веретільник — <https://orcid.org/0000-0002-1056-0277>, В.В. Барабаш — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>,  
А.П. Ігнатів — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>, В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>

© Ф.К. Біктагіров, О.В. Веретільник, В.О. Шаповалов, О.В. Гнатушенко, А.П. Ігнатів, В.В. Барабаш, 2021

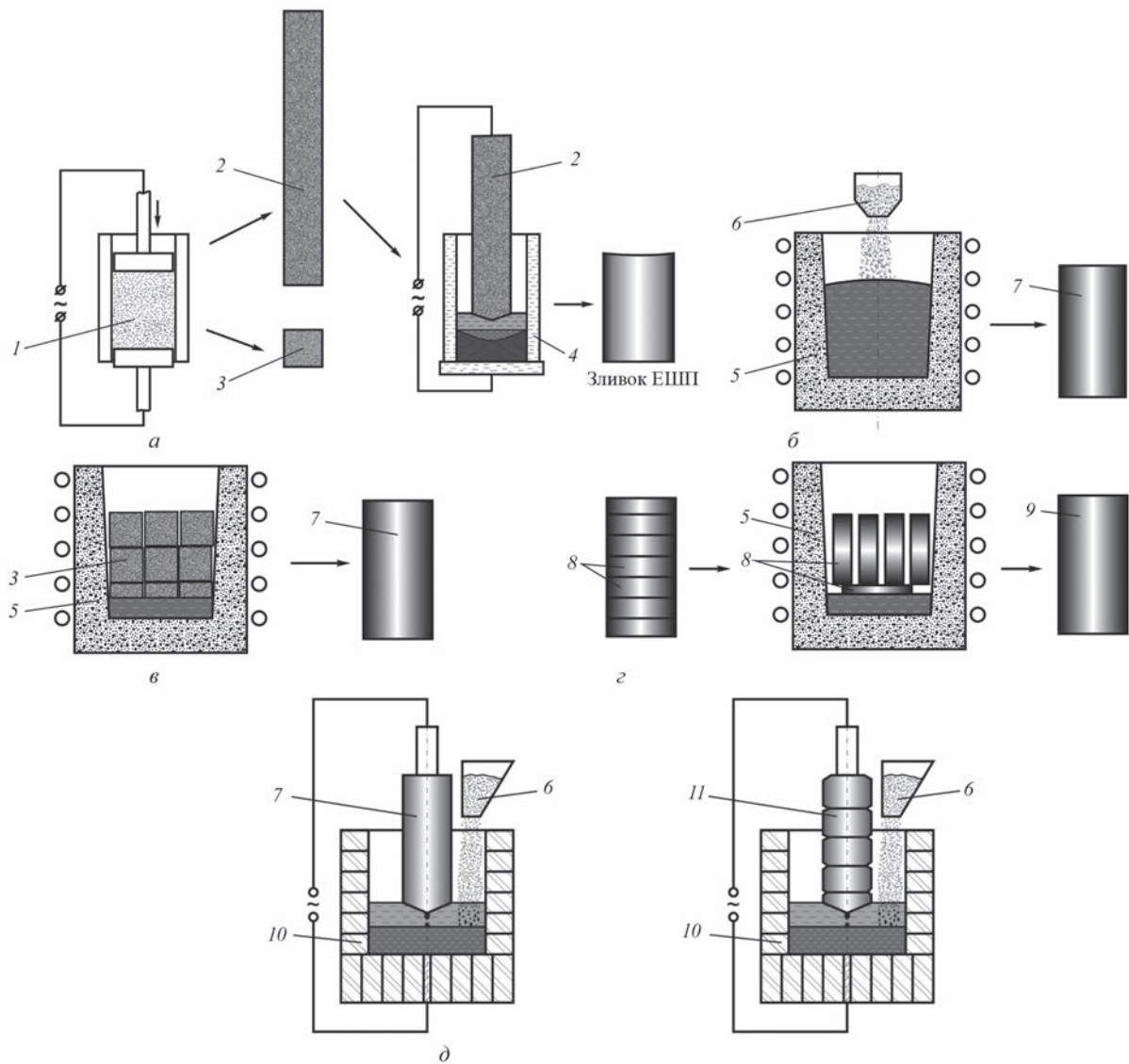


Рис. 1. Технологічні схеми переробки стружки: *а* — компактування стружки під дією струму (електрод, брикет), ЕШП компактованого електрода; *б* — ІТП стружки; *в* — ІТП брикетів; *г* — ІТП зливка, отриманого при ІТП стружки (подвійний перепад); *д* — ЕШТП витратного електрода з додаванням стружки; 1 — компактування стружки під дією струму; 2 — електрод для ЕШП, отриманий внаслідок компактування стружки; 3 — брикети зі стружки; 4 — кристалізатор; 5 — індукційна тигельна піч; 6 — стружка; 7 — зливки ІТП зі стружки; 8 — розрізаний зливки ІТП; 9 — зливки ІТП подвійного перепаду; 10 — електрошлакова тигельна піч; 11 — витратний електрод із кускового брухту

60 до 120 кг. При ЕШП використовували суміш шлаків АНФ-6 і АН-295, а при ЕШТП — шлак АН-295.

Низький вміст вуглецю в усіх марках стружки унеможливив застосування для здійснення електрошлакового процесу невитратного графітованого електрода. Застосування невитратних металевих електродів, крім додаткових витрат на їх експлуатацію та витрат тепла на охолодження, практично неминуче пов'язане з небажаним розчиненням в тій чи іншій мірі матеріалу наконечника в шлаку і попаданням його в метал, що переплавляється [5, 6]. Одним з видів здійснення електрошлакового процесу з невитратним електродом по суті є і плавка в струмопідвідному кристалізаторі (СПК) [7]. Однак з огляду на виділення джоулевого тепла на периферії

шлакової ванни і порівняно невисоких температур в центрі така плавка більше підходить для переробки стружки металів, що мають низьку температуру плавлення. У літературі окрім прикладів плавки в СПК стружки міді є відомості щодо переробки лише стружки швидкорізальної сталі (температура плавлення близько 1300 °С) у кристалізаторі діаметром лише 60 мм і при вкрай низькій швидкості плавлення, що становила 11...13 кг/год [8, 9].

З огляду на особливості та обмеження застосування невитратних електродів в експериментах, що проводилися, для електрошлакової плавки стружки високолегованих сталей і сплавів використовували витратні електроди. Отримували такі електроди або компактуванням стружки (табл. 1,

плавки 1, 2, 8), або шляхом плавки стружки в індукційній печі з отриманням зливка (плавка 6), або зварюванням кускових відходів (плавки 9, 10). Ураховуючи те, що для холодного брикетування стружки, яка використовувалася в дослідженнях, необхідні дуже великі зусилля пресування, компактування здійснювали під струмом, як описано в роботах [10, 11]. Діаметр компактованих електродів становив 100 мм, а довжина — до 1000 мм. Щільність таких електродів становила 55...65 % від щільності литого металу. Зливки масою 30 кг, отриманий з металу ІТП, мав діаметр 120...130 мм і для більшості плавки, виконаних способом ЕШТП, використовувалися електроди, отримані зварюванням двох таких заготовок. У випадку необхідності збільшення маси компактованого електрода, що підлягав переплаву, його також отримували зварюванням з двох частин при загальній довжині до 1800 мм. При ЕШТП кількість стружки, що переплавлялась, становила від 45 до 55 % від загальної маси плавки. Стружку подавали на плавку після наведення шлакової ванни за технологією «твердого» старту.

Узагальнені показники питомих витрат електроенергії, продуктивності та оцінки якості металу, що одержали, для різних варіантів плавки наведені в табл. 2. Стосовно електрошлакової плавки, враховувалися витрати електроенергії при виготовленні витратного електрода компактуванням стружки або відливанням зливка з металу, виплавленого в індукційній печі. Питомі витрати електроенергії при компактуванні стружки сплавів

**Таблиця 2.** Показники різних видів переробки стружки високолегованих сталей і сплавів

Плавка	Питомі витрати електроенергії, $q$ , кВт·год/кг	Продуктивність плавки $P$ , кг/год	Якість металу
1	2,4...2,8	55...60	Добра
2	2,5...2,8	—»—	—»—
3	1,7...2,1	—»—	Незадовільна
4	0,75...0,80	45...50	—»—
5	1,35...1,50	55...65	Задовільна
6	1,5...1,6	100...110	Добра
7	1,40...1,45	130...140	—»—
8	2,1...2,3	60...65	—»—
9	0,70...0,75	110...120	—»—
10	0,55...0,65	130...160	—»—

ЭП609 і ЭИ617 становили від 1,1 до 1,4 кВт·год/кг, а стружки сталі X18N10T — від 0,7 до 0,9 кВт·год/кг. При індукційній плавці брикетів також урахувалися витрати електроенергії на їх виготовлення, а при подвійній індукційній плавці (табл. 2, плавка 5) наведені дані сумарних витрат електроенергії цих двох плавки.

Як і слід було очікувати, з огляду на значні енерговитрати на процес брикетування стружки під струмом і електрошлаковий переплав у кристалізаторі, що охолоджується, найбільші питомі витрати електроенергії були при плавках 1, 2 і 8, а найменші — при плавці небрикетованої стружки в індукційній печі і електрошлаковій тигельній плавці з використанням електрода з кускового брухту (плавки 4 та 10). Однак зливки, отримані з металу ІТП, як правило, мали внутрішні дефекти у вигляді поруватості. Тільки після повторного їх



Рис. 2. Зовнішній вигляд електродів із кускового брухту для ЕШТП





Рис. 3. Плавка електрода із кускового брухту в електрошлаковій тигельній печі

переплаву в індукційній печі вони могли бути придатні для подальшого використання. Проте, якість металу при такому варіанті плавки поступалася якості металу, що був виплавлений в електрошлаковій тигельній печі з аналогічних зливків, отриманих ІТП.

При спільній ЕШТП витратного електрода і стружки досягається максимальна продуктивність процесу (плавки 7, 10), яка на 30...40 % вище в порівнянні з плавкою тільки витратного електрода (плавки 6, 9). Більш того, стружка, що подається на плавку, зменшує теплове навантаження на стінки тигля, завдяки чому в кілька разів підвищується стійкість його вогнетривкої футеровки.

Проведені експерименти щодо різних видів переробки стружки показали, що найкращою є технологія електрошлакової плавки в тигельній печі витратного електрода, сформованого з кускових відходів та одночасним додаванням стружки в процесі плавки. На рис. 2 у якості прикладу показано електроди, отримані зварюванням різних відпрацьованих деталей зі сталі X18H10T, а на рис. 3 — процес електрошлакової плавки з використанням такого електрода.

При відсутності кускового брухту витратний електрод доцільно отримувати з металу, виплавленого в ЕШТП. Тоді при співвідношенні маси витратного електрода до маси стружки, що переплавляється, як 1:1, питомі витрати електроенергії на переробку стружки подвоюються і з урахуванням умов експериментів, що проводились,

будуть складати близько 1,1...1,3 кВт·год/кг. Для порівняння в роботі [12] наводяться дані щодо переробки стружки сплаву ЭИ617 способом ЕШТП, але з використанням невитратного електрода. Витрати електроенергії, згідно з наведеними в цій роботі даними, при такому варіанті плавки складають 1,4...1,8 кВт·год/кг, а продуктивність — 120...140 кг/год. Дані показники близькі до тих, що мають місце в наших дослідженнях із використанням литого витратного електрода, отриманого зі стружки, але при цьому повністю виключається забруднення металу матеріалом невитратного електрода. Також, у випадку ЕШТП із витратним електродом при збільшенні кількості стружки, що переплавляється, до 60...70 % від загальної маси плавки, що можливо за рахунок використання технології «рідкого» старту, питомі витрати електроенергії будуть ще нижчі у порівнянні з експериментами, які мали місце в дослідженнях, що проводились.

Окрім техніко-економічних переваг при електрошлаковій тигельній плавці стружки практично відсутні втрати на вигар (не більше 2 %) і є можливість проведення активних металургійних заходів, таких як рафінування і легування, що дозволяє отримувати метал високої якості. При невеликій кількості легованої стружки (десятки або сотні тонн на рік) доцільно переробляти її безпосередньо на підприємстві, де вона утворюється. Для цього найбільш придатними є електрошлакові печі порівняно малої встановленої потужності (300...500 кВА) продуктивністю 1...3 т на добу.

Виконаний аналіз свідчить, що технологія електрошлакової тигельної плавки дозволяє з високою ефективністю переробляти стружку високолегованих сталей і сплавів з отриманням якісного металу.

## Висновки

1. При переробці стружки високолегованих сталей і сплавів із використанням електрошлакових технологій найменші витрати електроенергії та максимальна продуктивність досягаються при спільній електрошлаковій тигельній плавці небрикетованої стружки і витратного електрода.

2. Кількість стружки, що переплавляється при ЕШТП із витратним електродом, становить не менше 50 % від загальної маси плавки і може бути збільшена за рахунок удосконалення технологічного процесу.

3. Рафінування, легування і модифікування металу в умовах електрошлакової тигельної плавки дозволяє отримувати зі стружки та відходів високолегованих сталей і сплавів заготовки високої якості при незначних (1...2 %) втратах на вигар легуючих елементів.

## Список літератури

1. Волков А.Е., Гохман Г.З., Шалимов Ал.Г. (1984) Плавление и рафинирование металла в перегретом шлаке некомпактных материалов. *Сталь*, **7**, 30–33.
2. Волков А.Е., Шалимов Ал.Г. (1989) Производство легированной стали методом электрошлакового переплава стружки. *Там же*, **12**, 27–29.
3. Биктагиров Ф.К. (2003) Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщение 2. *Современная электрометаллургия*, **1**, 5–9.
4. Кочкин С.В. (2015) Разработка технологии переработки металлической стружки методом электрошлакового переплава. *Современные научные исследования и инновации*, **6**, Ч. 1. <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/53989>.
5. Лютыи И.Ю., Лагаш Ю.В. (1982) *Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов*. Киев, Наукова думка.
6. Лютыи И.Ю., Лагаш Ю.В., Волкотруб Н.П. и др. (1978) К вопросу использования охлаждаемых металлических электродов при электрошлаковом процессе. *Специальная электрометаллургия*, **30**, 28–33.
7. Кусков Ю.М. (2001) Электрошлаковый переплав отходов различных производств с использованием нерасходуемого водоохлаждаемого электрода. *Электрометаллургия*, **2**, 24–28.
8. Кусков Ю.М., Безкоровайный В.И., Ус В.И., Медовар Л.Б. (1992) Безэлектродная технология электрошлакового переплава медных отходов. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3**, 29–32.
9. Кусков Ю.М., Рябцев И.А., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. (2020) *Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлосодержащих отходов*. Киев, Интерсервис.
10. Шаповалов В.А., Биктагиров Ф.К., Бурнашев В.Р. и др. (2011) Электротермическое компактирование металлических материалов. *Современная электрометаллургия*, **4**, 42–45.
11. 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.
12. Жеребцов С. Н. (2012) Применение технологии электрошлакового переплава стружки высоколегированных сталей и сплавов для получения мерной заготовки. *Электрометаллургия*, **4**, 32–34.

## References

1. Volkov, A.E., Gokhman, G.Z., Shalimov, Al.G. (1984) Melting and refining of metal in a superheated slag of non-compact materials. *Stal*, **7**, 30–33 [in Russian].
2. Volkov, A.E., Shalimov, Al.G. (1989) Production of alloy steel by the method of electroslag remelting of chips. *Ibid.*, **12**, 27–29 [in Russian].
3. Biktagirov, F.K. (2003) Application of the electroslag process with non-consumable electrodes for melting, refining and processing of metals. Message 2. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 5–9 [in Russian].
4. Kochkin, S.V. (2015) Development of a technology for processing metal shavings by the method of electroslag remelting. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Innovatsii*, **6**, Pt 1 [in Russian]. <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/53989>
5. Lyutyi, I.Yu., Latash, Yu.V. (1982) *Electroslag melting and refining of metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Liutyi, I.Yu., Latash, Yu.V., Volkotrub, N.P. et al. (1978) On the use of cooled metal electrodes in the electroslag process. *Spets. Elektrometall.*, **30**, 28–33 [in Russian].
7. Kuskov, Yu.M. (2001) Electroslag remelting of waste from various productions using a nonconsumable water-cooled electrode. *Elektrometallurgiya*, **2**, 24–28 [in Russian].
8. Kuskov, Yu.M., Bezkorovajny, V.I., Us, V.I., Medovar, L.B. (1992) Electrodeless technology of electroslag remelting of copper waste. *Problemy Spets. Elektrometall.*, **3**, 29–32 [in Russian].
9. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentuygov, I.P. (2020) *Electroslag technologies of surfacing and recycling of metal and metal-containing waste*. Kiev, Interservis [in Russian].
10. Shapovalov, V.A., Biktagirov, F.K., Burnashev, V.R. et al. (2011) Electrothermal compacting of metallic materials. *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 251–254.
11. Shapovalov, V.A., Biktagirov, F.K., Burnashev, V.R. et al. (2011) Electrothermal compacting of metallic materials: Opportunities and prospects. *Zagotovitelnye Proizvodstva v Mashinostroenii*, **5**, 5–10 [in Russian].
12. Zherebtsov, S.N (2012) Application of electroslag remelting technology of high-alloy steel and alloy shavings for producing cut-to-length sections. *Elektrometallurgiya*, **4**, 32–34 [in Russian].

## COMPARATIVE INDICES OF DIFFERENT METHODS OF PROCESSING SHAVINGS OF HIGH-ALLOYED STEELS AND ALLOYS

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

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

Experiments were performed on processing briquetted and non-briquetted shavings of Kh18N10T stainless steel and 07Kh12NMBF (EP609) and KhN70VMTYuF (EI617) heat-resistant alloys in induction furnaces and electroslag furnaces. It is shown that the most preferable is the technology of simultaneous remelting of a consumable electrode from lump wastes and shavings in an electroslag crucible furnace. In this case, at melting in 120 kg furnace at the amount of shavings fed for melting, equal to 45...55 % of the total melt mass, the specific power consumption is equal to 0.55...0.65 kW/h/kg, productivity is 130...160 kg/h, and burnout losses are not more than 1...2 %. At electroslag crucible melting it is possible to actively conduct such metallurgical operations as refining, modification, alloying and deoxidation that allows producing high quality metal. Ref. 12, Tabl. 2, Fig. 3.

*Key words: shavings; processing; induction melting; electroslag melting; electric power; productivity; quality*

Надійшла до редакції 09.09.2021