

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА ИЗ СМЕСИ СТРУЖКИ

А.Н. Мартыненко, аспирант  
Донецкий национальный технический университет  
(Россия, г. Донецк)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-3-2-25-30

**Аннотация.** Статья посвящена разработке способа компактирования смеси алюминиевой и стальной стружки в заготовку для дальнейшего электрошлакового переплава. Переплав металлостружечной заготовки предполагает получение алюминиевой лигатуры. Проведенные исследования по спеканию смеси стружки сплавов АК8 и 95Х18 показали, что изготовленные брикеты относительно прочные и их можно использовать в качестве заготовок для расходоуемого электрода. По разработанной технологии, из смеси стружки АК8-95Х18 (3/1), методом спекания, был изготовлен металлостружечный расходоуемый электрод и переплавлен в шлаковой ванне при ЭШП. Установлено, что полученный расходоуемый электрод оплавлялся равномерно, сохраняя при этом прочность и целостность.

**Ключевые слова:** смесь металлической стружки, электрошлаковая плавка, расходоуемый электрод, флюс, спекание, брикет.

При изготовлении изделий из металла появляется большое количество отходов в виде металлической стружки. Металлическая стружка может составлять до 60% от веса обрабатываемой металлической заготовки [1]. В свете ограниченности запасов рудного сырья, рециклинг металлических отходов в виде стружки приобретает всё большее значение в удовлетворении потребности народного хозяйства в металлах [2].

На практике передел металлической стружки производится в основном в пламенных агрегатах, преимущественно, в отражательных, шахтных печах, дуговых и индукционных, работа которых характеризуется недостаточно высоким извлечением металлов из вторичного сырья, высоким их угаром, недостаточно высоким качеством продукции и, как следствие сказанного, невысокими технико-экономическими показателями процесса. Кроме того, трудности со сбором, транспортировкой, хранением, унификацией по видам и химическому составу осложняют переработку и повторное использование стружки. По причине сложности использования стружечных отходов многие литейные предприятия не применяют их переплав, что является основанием для поис-

ка новых более эффективных методов рециклинга данного вида вторичного сырья. Перспективным методом в решении поставленной задачи является применение электрошлакового переплава (ЭШП). В основе данного способа производства высококачественного металла, был положен процесс плавления расходоуемых электродов (РЭ) под слоем шлака в кристаллизаторе или футерованном тигле. Существует ряд исследований и применяемых технологий, подтверждающих целесообразность применения ЭШП при переработке стружки различных металлов [3].

Важно отметить, на машиностроительных заводах образуется стружка различных металлов, наиболее много стальная и алюминиевая, и по причине того, что современная металлургическая промышленность требует применение лигатур, составляет большой интерес разработка комплексной технологии рециклинга, которая даст возможность получать разнообразные сплавы из многовидовых металлических отходов. В связи вышесказанным целью данного исследования было разработка способа компактирования смеси стружки алюминий-сталь в РЭ, для дальнейшего электрошлакового переплава.

### **Выбор прототипа способа изготовления расходоуемого электрода**

Стандартный способ переработки металлических отходов с использованием ЭШП включает следующие основные этапы:

- 1) плавка отходов в обычном плавильном агрегате;
- 2) разливка РЭ;
- 3) ЭШП электродов;
- 4) получение литых заготовок.

Высокая себестоимость металла, получаемого по данной технологии, объясняется в первую очередь высокими затратами на изготовление РЭ. Например, есть технология компактирования стружки в РЭ, суть которой заключается в совмещении процессов прессования и электротермического нагрева [4]. Так же способом получения РЭ из стружки, может быть комбинирование стружки и жидкой лигатуры заданного химического состава методом их одновременной подачи в специальную изложницу. Для использования этого способа, необходимо изучить механизм сплавления стальной стружки с алюминиевым расплавом и определить количественную зависимость между массой расплава и массой сплавленной стружки, а также влияние технологических факторов на этот показатель. На данный момент времени есть изобретения в которых применяется компактирование стружки путём заливки расплавом, но в них не представлены указанные зависимости, т.е. данный способ требует углублённых исследований. В целом, получение металлостружеч-

ного РЭ путем заливки алюминиевым расплавом стальной стружки возможно, но при этом сложно добиться равномерности структуры по всему объёму заготовки, кроме того, для получения расплава требуется дополнительный металлургический передел, поэтому было решено провести исследование в области спекания смеси стружек.

### **Исследование спекания смеси стружки в расходоуемый электрод**

Для ЭШП важно получить прочную заготовку, которую в дальнейшем можно будет переплавить. Прочность связи между кусками стружки будет зависеть от следующих факторов: химического состава стружки, чистоты поверхности (в том числе состояния оксидных плёнок), температуры, степени и скорости деформации, гидростатического давления в зоне схватывания и длительности деформации.

Исследования спекания стружечных смесей стружек алюминиевого сплава АК8 и стали 95Х18 проводилось при трёх температурах (750°C, 800°C, 850°C) и трёх соотношениях по массе (4/1, 3/1, 2/1). Эксперимент заключался в засыпке стружечной смеси в тигель и выдержке до соответствующей температуры без обжатия. Нагрев проводился в печи сопротивления с селитовыми нагревателями в воздушной атмосфере. Результаты спекания показаны на рисунке 2. Анализ показал, что в спекённых брикетах основой целостности является связь между кусочками алюминия. Наибольшая прочность образцов получилась при 850°C (см. рис. 1).

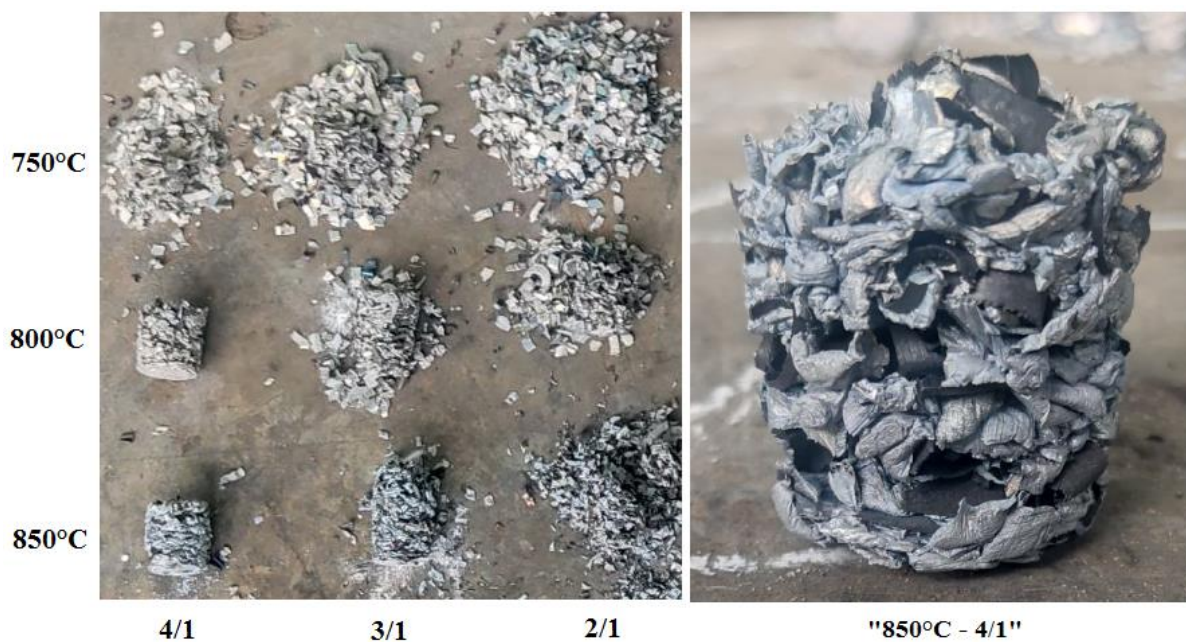


Рис. 1. Результаты спекания

Для последовательного описания процесса спекания стружки весьма важным является изучение возможных механизмов и кинетики взаимного припекания металлов, которые в начальный момент контактируют в точке. Можно сделать вывод – чем больше контактов между кусочками стружки тем больше прочность спекаемого образца, что прежде всего зависит от насыпной плотности. В свою очередь насыпная плотность зависит от размеров и геометрии стружки.

На механические свойства спеченных изделий, кроме свойств исходных материалов, влияют условия прессования и спекания. Однако из-за отсутствия полных рекомендаций по расчету технологических процессов получение материалов с заранее заданными свойствами ведется в основном экспериментальным путем. Установление математических зависимостей между прочностью металлостружечного РЭ и необходимым технологическими параметрами

при прессовании, с учетом изменения пористости во время спекания, представляет важный вопрос.

Далее проводился эксперимент с брикетированием стружечной смеси на лабораторном копере для уплотнения формовочных смесей. Смесь стружек алюминиевого сплава АК8 и сталь 95Х18 в пропорции 3/1 засыпалась в специальную гильзу с поддоном и нагревалась до 550°C. После устанавливалась в копер и производилось три удара (энергия уплотнения 0,93 кДж), полученный брикет извлекался. Так же производилась двойная засыпка, т.е. после первого прессования засыпалась вторая порция разогретой смеси и так же уплотнялась. В обоих случаях получились прочные брикеты массой  $m_1 = 163\text{г}$  и  $m_2 = 84\text{г}$ , размерами  $h_1 = 44\text{мм}$  и  $h_2 = 21\text{ мм}$ ,  $d_1 = d_2 = 50\text{мм}$ , с расчетной плотностью  $\rho_{61} = 1887\text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{62} = 2038\text{ кг/м}^3$ .

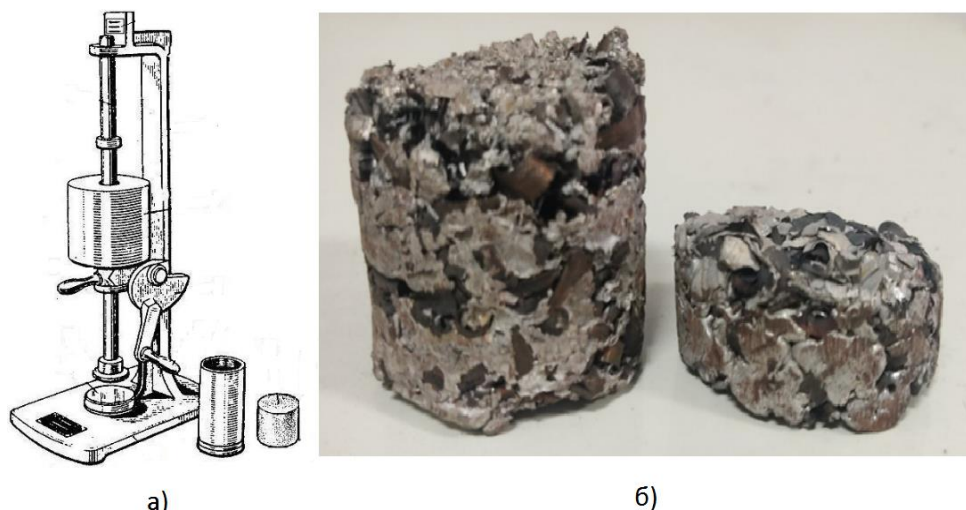


Рис. 2. а) лабораторный копер б) стружечные брикеты АК8-95X18 (3/1)

Прочность спеченных материалов можно вычислить по формуле из [7]:

$$\sigma_b = \sigma_k \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \eta\right) \quad (1)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности готового образца,  $\sigma_k$  – предел прочности песпористого образца,  $\eta$  – пористость.

Пористость брикета можно разчитать по выражению:

$$\eta = \frac{\Delta V}{V_{об}} \quad (2)$$

где  $\Delta V$  – объем занимаемый порами,  $V_{об}$  – объем брикета.

Приняв  $\Delta V = V_{об} - V_{\mu}$ , где  $V_{\mu}$  – объем изделия с нулевой пористостью, с учетом того, что в стружечных смесях соотношение 3/1, по формуле (1) рассчитана пористость брикетов:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{V_1 - (m_{Al}/\rho_{Al} + m_{Fe}/\rho_{Fe})}{V_1} \\ \eta_1 &= \frac{3,14 \cdot 25^2 \cdot 44 - (0,75 \cdot 163/2700 + 0,25 \cdot 163/7800)}{3,14 \cdot 25^2 \cdot 44} = \\ &= \frac{0,00086 - (0,000045 + 0,0000052)}{0,00086} = \frac{0,00081}{0,00086} = 0,94 \\ \eta_2 &= \frac{V_2 - (m_{Al}/\rho_{Al} + m_{Fe}/\rho_{Fe})}{V_2} \\ \eta_2 &= \frac{3,14 \cdot 25^2 \cdot 21 - (0,75 \cdot 84/2700 + 0,25 \cdot 84/7800)}{3,14 \cdot 25^2 \cdot 21} = \\ &= \frac{0,00041 - (0,000023 + 0,0000027)}{0,00041} = \frac{0,00038}{0,00041} = 0,92 \end{aligned}$$

По формуле (2) посчитана прочность брикетов:

$$\sigma_{o1} = \sigma_{Al} \left(1 - \frac{2}{3} \cdot 0,94\right) = 180 \text{ МПа} \cdot 0,37 = 67 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{02} = \sigma_{Al} \left( 1 - \frac{2}{3} \cdot 0,92 \right) = 180 \text{ МПа} \cdot 0,39 = 70 \text{ МПа}$$

В завершении, по разработанной методике, из той же смеси стружки, была изготовлена заготовка для РЭ, следующим образом: смесь разогревалась до 550°C и засыпалась порциями в чугунный кокиль, после каждой засыпки уплотнялась вручную чугунной трамбовкой. Далее, проводился электрошлаковая плавка в графитовом

тигле – полученную заготовку металлостружечного РЭ, вручную с использованием клещей, погружали в шлаковую ванну и равномерно оплавливали. В процессе плавки заготовка сохраняла целостность и прочность по высоте. Основные этапы эксперимента показаны на рисунке 3.

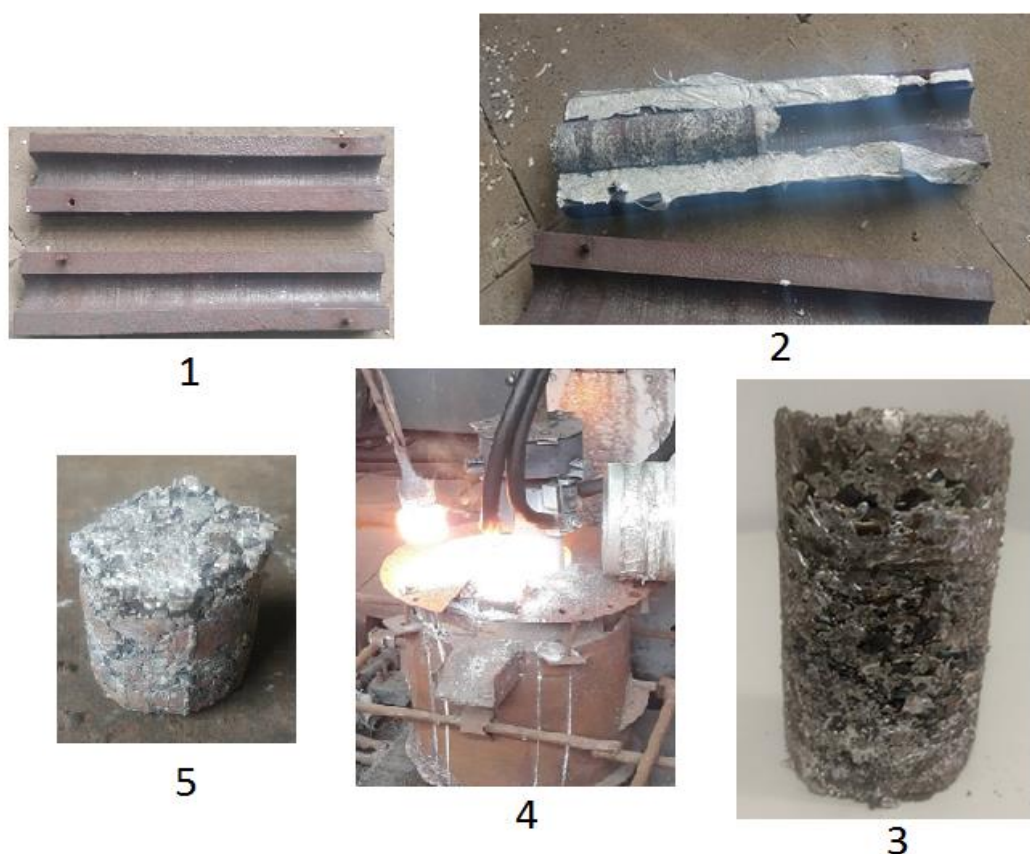


Рис. 3. Эксперимент по изготовлению металлостружечного РЭ: 1 – кокиль; 2 – кокиль в разобранном виде с заготовкой металлостружечного РЭ; 3 – заготовка металлостружечного РЭ; 4 – процесс плавки; 5 – оплавленный остаток.

### Выводы

Проведенный обзор технологических особенностей переработки вторичного сырья методами ЭШП, показал широкие возможности данного способа. Для рециклинга металлических отходов можно использования типовое оборудование ЭШП без реконструкции. Наиболее перспективным направлением использования ЭШП можно выделить переработку металлической стружки.

Проведенные исследования по спеканию смеси стружки АК8-95Х18 показали,

что основой целостности получаемых образцов является связь между кусочками алюминия. Металлостружечные брикеты, изготовленные на лабораторном копке относительно прочные ( $\sigma_b = 70$  МПа) с плотность 75 % от плотности монолитного алюминия, что достаточно для их использования в качестве заготовок для РЭ.

В процессе исследований был проведен промышленный эксперимент по изготовлению металлостружечного РЭ из смеси стружки АК8-95Х18 (3/1) спеканием, и его

последующим переплавом в шлаковой ванне при ЭШП. Установлено, что полученный РЭ оплавлялся равномерно, сохраняя при этом прочность и целостность.

Можно предположить, что получаемый

промежуточный сплав по предложенной технологии, можно использовать для выплавки фехрали, в состав которой входят все основные компоненты сплавов использованной смеси стружки.

#### Библиографический список

1. Лебедева Е.Г., Лебедев Н.Н. Анализ проблемы утилизации металлической стружки в производственном цикле машиностроительного производства // Оригинальные исследования. – 2022. – №6. – С. 338-342.
2. Смирнов, В.В. Рециклинг – стратегическое направление повышения эффективности металлургии в Российской Федерации / Учет. Анализ. Аудит = Accounting. Analysis. Auditing. – 2018. – №5. – С. 30-39.
3. Мартыненко А.Н., Троянский А.А. Возможности использования электрошлаковой технологии для рециклинга металлосодержащих отходов // Сборник докладов материалов VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов / редкол.: С.М. Сафьянц (пред.) и др. – Донецк: ДОННТУ, 2020. – С. 6-11.
4. Шаповалов В.А., Биктагиров Ф.К., Бурнашев В.Р., Колесниченко В.И., Степаненко В.В., Рейда Н.В., Карускевич О.В., Ботвинко Д.В. Электротермическое компактирование металлических материалов. Энергоресурсосбережение. Современная электрометаллургия. – 2011. – №4. – С. 42-45.
5. Трощенко В. Т., Руденко В. Н. Прочность металлокерамических материалов и методы ее определения. – Киев: Техника, 1956.

### DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING A CONSUMABLE ELECTRODE FOR ELECTROSLAG REMELTING FROM A CHIP MIXTURE

**A.N. Martynenko**, *Postgraduate Student*  
**Donetsk National Technical University**  
**(Russia, Donetsk)**

**Abstract.** *The article is devoted to the development of a method for compacting a mixture of aluminum and steel chips into a billet for further electroslag remelting. The remelting of the metal of the chip billet involves the production of aluminum ligature. Studies conducted on sintering a mixture of chips of AK8 and 95X18 alloys have shown that the manufactured briquettes are relatively durable and can be used as blanks for the consumable electrode. According to the developed technology, a metal-chip consumable electrode was made from a mixture of AK8-95X18 (3/1) chips by sintering and melted in a slag bath at ESP. It was found that the resulting consumable electrode was melted evenly, while maintaining strength and integrity.*

**Keywords:** *a mixture of metal chips, electroslag melting, consumable electrode, flux, sintering, briquettes.*