



УДК 669.187.25

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Л. В. ТРИБУШЕВСКИЙ, Г. А. РУМЯНЦЕВА, Б. М. НЕМЕНЕНОК, Я. Л. МЯКИННИК,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.  
E-mail: nemenenok@bntu.by.*

*Проанализированы существующие технологии металлургического производства, отличающиеся минимальным вредным воздействием на окружающую среду. Выбросы в атмосферу углекислого газа можно исключить при использовании водорода в качестве восстановителя оксидов железа. Лучшие результаты обеспечиваются при получении водорода электролизом воды, но такие технологии требуют серьезных инвестиций. Более реальным в плане создания зеленых технологий является снижение потребления природного газа, улавливание отходящих газов металлургического производства и использование их для производства электроэнергии и новых видов продукции: метанола, синтетического спирта, удобрений и полимеров. Также перспективна реализация концепции NoWASTE, направленной на минимизацию отходов, подлежащих захоронению. Приведены примеры безотходных технологий переработки отходов алюминия в ООО «НПФ «Металлон».*

*Ключевые слова.* Зеленые технологии, безотходное производство, новые виды продукции.

## APPLICATION OF GREEN TECHNOLOGIES IN METALLURGICAL PRODUCTION

*L. V. TRIBUSHEVSKY, G. A. RUMYANTSEVA, B. M. NEMENENOK, Ya. L. MYAKINNIK,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nemenenok@bntu.by.*

*This paper analyzes current metallurgical production technologies that minimize environmental impact. The use of hydrogen as a reducing agent for iron oxides can eliminate CO<sub>2</sub> emissions. The best results are achieved with hydrogen produced by water electrolysis, although such technologies require significant investments. A more feasible approach to implementing green technologies in metallurgy involves reducing natural gas consumption, capturing waste gases from metallurgical processes, and using them to generate electricity and produce new products such as methanol, synthetic alcohol, fertilizers, and polymers. Another essential element of green technologies is the implementation of the NoWASTE concept, aimed at minimizing waste disposal. Examples of zero-waste aluminum processing technologies at "NPF Metallon" are provided.*

*Keywords.* Green technologies, zero-waste production, new product types.

Для металлургического производства характерно образование больших объемов техногенных отходов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. При этом загрязнение атмосферы пылегазовыми выбросами от агрегатов металлургического производства вызывает изменение климата и является глобальной экологической проблемой [1].

Разработка зеленых технологий в металлургическом производстве сводится к исключению выбросов оксидов углерода в атмосферу и минимизации отходов, подлежащих захоронению.

Преобладающий в мире способ производства стали включает выплавку чугуна в доменных печах с последующим его переделом в сталь в кислородных конвертерах. Значительно меньшие объемы стали получают на основе твердого губчатого железа, известного как железо прямого восстановления (Direct Reduced Iron, DRI), с последующей его переработкой в электродуговой печи (ЭДП). При этом способе в качестве металлошихты используется железная руда, восстанавливаемая монооксидом углерода и водородом [2].

За последние десятилетия структурные изменения в производстве стали, модернизация и инновации в энергетике, технологии в машиностроении, наглядным примером которых служит сталелитейная отрасль Германии, привели к резкому снижению удельного потребления энергии из первичных источников и удельных выбросов углекислого газа. Только за период с 1990 г. расход энергии

из первичных источников сократился на 13%, а количество выбросов  $\text{CO}_2$  – на 12,4 млн. т/год, что эквивалентно выбросам 4,9 млн. автомобилей среднего класса. Вместе с тем следует отметить, что на сталелитейную отрасль приходится лишь 6% общемирового объема выбросов и по сравнению со всеми производимыми материалами сталь отличается самым низким объемом выбросов  $\text{CO}_2$  на протяжении всего жизненного цикла. Например, удельные выбросы от производства молока превышают выбросы от стали на 50% [3].

Сталь является важнейшим материалом современного общества, и по мере роста населения в мире и развития урбанизации ожидается дальнейшее увеличение ее производства. Если основной схеме получения стали не будет найдена альтернативная замена, то выбросы  $\text{CO}_2$  от металлургической промышленности к 2025 г. увеличатся на 25%.

Если сравнивать объемы выбросов  $\text{CO}_2$  в доменно-конвертерном производстве стали с вариантом «установка прямого восстановления железа – электродуговая печь» с шахтной печью и подачей горячего DRI в ЭДП, принимая углеродную нагрузку электроэнергии равной 200 г/(кВт·ч), то второй вариант дает выигрыш порядка 35%. Выбросы  $\text{CO}_2$  при производстве DRI связаны с углеродом, содержащимся в природном газе. В случае замены водородом природного газа при производстве DRI и использовании экологически чистой электроэнергии можно было бы производить сталь без выбросов  $\text{CO}_2$  [2]. В связи с этим тема сокращения объемов выбросов  $\text{CO}_2$  и использования водорода в качестве восстановителя приобретает все большее значение из-за стремления к декарбонизации. Согласно Дорожной карте по климату Еврокомиссии, к 2050 г. выбросы  $\text{CO}_2$  должны снизиться более чем на 80% по сравнению с 1990 г.

Над технологиями сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  при производстве стали ведется постоянная работа. Среди примеров можно отметить следующие [2]:

- проект HYBRIT;
- процесс жидкофазного восстановления HIsarna;
- разработка процесса прямого восстановления чистым водородом;
- развитие технологий энергосбережения;
- исключение углерода и его монооксида из состава восстановителей, применяемых при восстановлении оксидов железа.

Значительное снижение выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу ожидается от реализации проекта пилотного завода HYBRIT для производства стали без использования природного топлива. Внедрение новой технологии позволит уменьшить общие выбросы  $\text{CO}_2$  в Швеции на 10%, в Финляндии – на 7%.

Технология HYBRIT предполагает использование водорода, который вырабатывают с помощью электричества, получаемого на энергетических установках, не использующих природное топливо, а в качестве отходов производства образуется чистая вода.

По мнению президентов шведских компаний SSAB AB, LKAB и Vattenfall, электрификация металлургической промышленности и использование водорода, не причиняющего ущерб климату, сыграют решающую роль в обществе будущего, основанном на отсутствии выбросов и отказе от использования природного топлива.

Также заслуживает внимания технология, разработанная компанией Tata Steel, которая позволит в будущем сократить выбросы  $\text{CO}_2$  металлургическими предприятиями как минимум на 20%. Компанией предложена установка HIsarna для производства чугуна, основанная на использовании реактора, загружаемого сверху железной рудой. В высокотемпературном циклонном конвертере температура во всем объеме выше температуры плавления железа, поэтому вдуваемая в реактор железная руда мгновенно расплавляется с образованием жидкого чугуна. В верхней части реактора (циклона) происходит дальнейшее повышение температуры после добавления чистого кислорода, который вступает в реакцию с присутствующим монооксидом углерода. В результате продолжительного контакта газов с расплавленной рудой она быстро плавится и жидкая фаза стекает на дно реактора, где в расплав вдувается порошкообразный уголь для окончательного восстановления.

Поскольку отходящие из установки газы почти на 100% состоят из  $\text{CO}_2$ , то появляется возможность их немедленного сбора и использования без дорогостоящих операций очистки.

Следует отметить, что полный отказ от углеродсодержащих восстановителей требует привлечения серьезных инвестиций, что в ряде случаев ставит под сомнение возможность реализации таких технологий. Поэтому более реалистичным вариантом ослабления негативного влияния металлургического производства на окружающую среду следует считать мероприятия по экономному использованию

природного газа и более эффективному вовлечению отходящих газов в производство новых видов продукции.

Сжигание  $1 \text{ м}^3$  метана при коэффициенте избытка воздуха, равном единице, сопровождается образованием  $1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$ ,  $2 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$  и  $7,524 \text{ м}^3$  азота. При этом доля  $\text{CO}_2$  в продуктах сгорания составляет 9,5 %,  $\text{H}_2\text{O}$  – 19,0 %, азота – 71,5 %. Поэтому любые технологии, направленные на экономное использование природного газа, обеспечивают получение не только экономического, но и экологического эффекта за счет сокращения выбросов  $\text{CO}_2$ .

Было бы ошибкой полагать и заявлять, что  $\text{CO}_2$  является отходом. Это весьма ценное сырье для производства новых видов продукции. Отходящие газы металлургического комбината в среднем содержат 43 %  $\text{N}_2$ , 25 %  $\text{CO}$ , 21 %  $\text{CO}_2$ , 8 %  $\text{H}_2$  и небольшое количество метана [2]. Они могут использоваться для выработки теплоты и электроэнергии, что в настоящее время уже является обычной практикой. При этом неизбежно образуется  $\text{CO}_2$ , попадающий в атмосферу. Однако отходящие газы можно использовать в качестве сырья для нужд металлургической, химической и энергетической отраслей. При этом требуется дополнительное количество водорода, получаемого путем электролиза воды. Необходимая электроэнергия должна быть экологически чистой. В противном случае углеродный след полученного водорода окажется столь велик, что нельзя будет говорить о каком-либо сокращении  $\text{CO}_2$  [2].

Наряду с выработкой теплоты и электроэнергии из отходящих газов, сопровождаемой выделением  $\text{CO}_2$ , можно получать метанол, синтетический спирт, удобрения и полимеры с помощью процесса Carbon2Chem, где выбросы  $\text{CO}_2$  отсутствуют [2].

Газы металлургического производства представляют собой смеси, которые необходимо очищать и подвергать дальнейшему разложению с использованием катализаторов. Известна технология CCUS, обеспечивающая улавливание, утилизацию и хранение диоксида углерода.

Группа ArcelorMittal совместно с компанией Lanzatech успешно продемонстрировала возможность ферментации доменного газа при помощи микробов с получением этанола. Из объема 100 тыс.  $\text{м}^3$  (при нормальных условиях) в час из доменного газа (из которого вымывается  $\text{CO}_2$ ), содержащего монооксид углерода, микробы и воду, получается 8 т/ч этанола, что эквивалентно 80 млн. л/год. Доменный газ не нуждается в очистке и микробы способны к выживанию в его атмосфере. Недостатком биотехнологии являются расходы на водоподготовку, поскольку микробы обитают в воде при температуре  $37^\circ\text{C}$ .

Зеленые технологии металлургического производства предполагают также исключение образования отходов, подлежащих захоронению. В Германии, например, разработана концепция NoWASTE, согласно которой за пределы предприятия можно вывозить только реально ценные материалы и таким образом использовать как можно меньше места для захоронения отходов в виде металлургических шлаков. Исходя из данной концепции, в настоящее время большую часть шлаков внепечной обработки используют в качестве шлакообразующих добавок в ЭДП [3]. При этом не требуются площади для их захоронения, улучшается экологическая ситуация из-за исключения распространения на большую территорию экотоксичных материалов, экономится первичное сырье в виде извести и бокситов.

Ряд безотходных технологий, реализуемых в ООО «НПФ «Металлон» [4] по переработке окисленных отходов алюминия и отходов алюминия 4-го сорта класса Г, также можно отнести к зеленым в металлургическом производстве (рис. 1, 2).

При переработке алюминиевой стружки и шлака металлическая составляющая используется для получения раскислителей в виде чушки, пирамидок и гранул, а вторичный шлак, пыль газоочистки и отсев стружки и шлака являются сырьем для производства разжижителей рафинировочного шлака и алюминиевой раскислительной смеси, используемой при раскислении рафинировочного шлака в процессе внепечной обработки стали. Такая схема переработки исключает образование отходов, подлежащих захоронению.

Следует отметить еще один положительный момент от использования алюминиевых раскислительных смесей и разжижителей на основе отходов переработки вторичного алюминия (ОПВА). Известно [5], что в составе рафинировочного шлака при затвердевании формируются соединения  $\text{C}_2\text{S}(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ , являющиеся причиной его саморазрушения из-за уменьшения плотности при протекании полиморфных  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ -превращений. Для стабилизации высокотемпературной модификации  $\alpha\text{-C}_2\text{S}$  используют оксиды  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  или их комбинации. В случае разжижения рафинировочных шлаков составами на основе ОПВА в шлаке увеличивается содержание  $\text{C}_{12}\text{A}_7(12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3)$ , а количество фазы  $\text{C}_2\text{S}$  уменьшается и при добавке более 18 % ОПВА шлак из нестабильного переходит в стабильное состояние. Стабилизированные рафинировочные шлаки можно использовать как шлакообразующие при плавке стали в крупнотоннажных электродуговых печах [6].

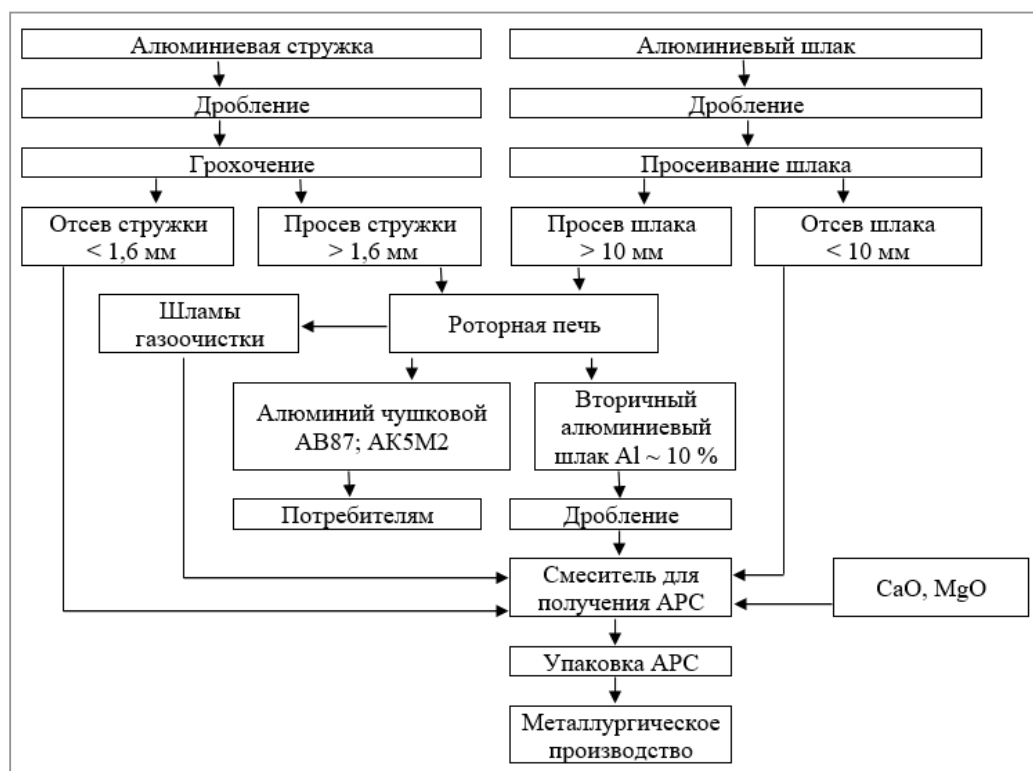


Рис. 1. Схема безотходной технологии переработки окисленных отходов алюминия в виде стружки и шлака

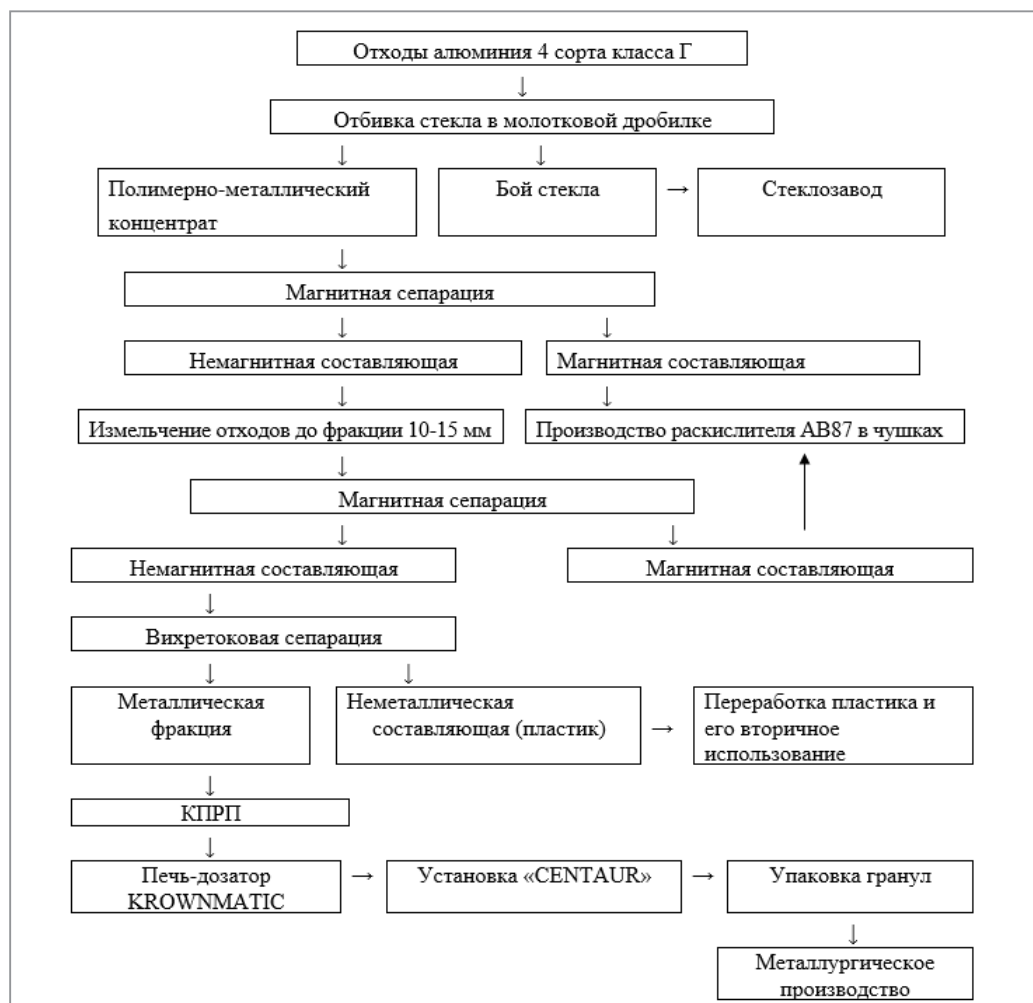


Рис. 2. Схема подготовки и переработки отходов алюминия 4-го сорта класса Г

Таким образом, при использовании бесфлюсовых алюминиевых шлаков решается вопрос снижения вредных выбросов при внепечной обработке стали, повышается стойкость футеровки сталеразливочных ковшей, рационально используются отвальные шлаки для производства новых видов реагентов, исключаются отходы 4-го класса опасности, подлежащие захоронению, создаются условия для применения обработанных рафинировочных шлаков в качестве шлакообразующих при плавке стали в электродуговых печах.

Переработка отходов алюминия 4-го сорта класса Г (рис. 2) обеспечивает получение алюминиевых гранул по сухой технологии, раскислителя марки АВ87 в чушках, боя стекла, поставляемого на стеклозавод, и выделение пластика, который после переработки реализуется потребителям.

Таким образом, зеленые технологии в металлургическом производстве имеют право на жизнь, и степень их реализации зависит от объемов инвестиций и видов получаемой продукции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Белый, О. А.** Экология промышленного производства / О. А. Белый, Б. М. Немененок. – Минск: БНТУ, 2016. – 345 с.
2. **Кудрин, В. А.** Теория и технология производства стали / В. А. Кудрин. – М.: Мир, 2003. – 528 с.
3. **Люнген, Х. Б.** Гибкие решения в сталелитейной отрасли для сокращения выбросов CO<sub>2</sub> и повышения эффективности производства / Х. Б. Люнген, М. Шпрехер // Черные металлы. – 2017. – С. 64–71.
4. Инновационные технологии переработки окисленных отходов алюминия / Л. В. Трибушевский [и др.]. – Минск: БНТУ, 2023. – 139 с.
5. Стабилизация рафинировочных шлаков путем корректировки их фазового состава / О. Ю. Шешуков [и др.] // Сталь. – 2016. – № 5. – С. 12–15.
6. Внепечная обработка стали отходами от переработки вторичного алюминия / Л. В. Трибушевский [и др.] // Литье и металлургия. – 2018. – № 1. – С. 100–105.

## REFERENCES

1. **Bely O.A., Nemenenok B.M.** *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of industrial production]. Minsk, BNTU Publ., 2016, 345 p.
2. **Kudrin V.A.** *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali* [Theory and technology of steel production]. Moscow, Mir Publ., 2003, 528 p.
3. **Lyngen H.B., Sprecher M.** Gибкие resheniya v stalelitejnoj otrasli dlya sokrashcheniya vybrosov CO<sub>2</sub> i povysheniya effektivnosti proizvodstva [Flexible solutions in the steel industry to reduce CO<sub>2</sub> emissions and increase production efficiency]. *Chernye metally = Ferrous Metals*, 2017, pp. 64–71.
4. **Tribushevsky L.V. [et al.]** *Innovacionnye tekhnologii pererabotki okislennykh othodov alyuminiya* [Innovative technologies for processing oxidized aluminum waste]. Minsk, BNTU Publ., 2023, 139 p.
5. **Sheshukov O. Yu. [et al.]** Stabilizaciya rafinirovochnyh shlakov putem korrekcirovki ih fazovogo sostava [Stabilization of refining slags by adjusting their phase composition]. *Stal' = Steel*, 2016, no. 5, pp. 12–15.
6. **Tribushevsky L.V., Nemenenok B.M., Rumiantseva G.V., Kulik M.A.** Vnepechnaya obrabotka stali othodami ot pererabotki vtorichnogo alyuminiya [Extra-furnace steel processing by recycled secondary aluminum waste]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 1, pp. 100–105.