



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-63-69>  
УДК 669.187.25

Поступила 26.09.2022  
Received 26.09.2022

## «ЗЕЛЕННЫЕ» ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ – МЕЧТА ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

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

Проведен анализ существующих технологий металлургического производства, отличающихся минимальным вредным воздействием на окружающую среду. Выбросы в атмосферу углекислого газа можно исключить при использовании водорода в качестве восстановителя оксидом железа. Лучшие результаты обеспечиваются при получении водорода электролизом воды, но такие технологии требуют серьезных инвестиций. Более реальным в плане создания «зеленых» технологий в металлургическом производстве 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. Составной частью «зеленых» технологий является также реализация концепции NoWASTE, направленной на минимизацию отходов, подлежащих захоронению. Приведены примеры безотходных технологий переработки отходов алюминия на ООО «НПФ «Металлон».

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

**Для цитирования.** Румянцова, Г. А. «Зеленые» технологии в металлургическом производстве – мечта или реальность? / Г. А. Румянцова, Б. М. Неменинок, А. В. Арабей, Л. В. Трибушевский // Литье и металлургия. 2022. № 4. С. 63–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-63-69>.

## “GREEN” TECHNOLOGIES IN METALLURGICAL PRODUCTION – A DREAM OR REALITY?

G. A. RUMIANTSEVA, B. M. NEMENENOK, A. V. ARABEY, L. V. TRIBUSHEVSKIY,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: nemenenok@bntu.by

The paper analyzes the existing technologies of metallurgical production with minimal harmful effects on the environment. Emissions of carbon dioxide into the atmosphere can be eliminated using hydrogen as a reducing agent with iron oxide. The best results are realized when hydrogen is produced by electrolysis of water, but such technologies require serious investments. More realistic in terms of creating “green” technologies in metallurgical production is to reduce the consumption of natural gas, capture waste gases of metallurgical production and use them to produce electricity and new types of products: methanol, synthetic alcohol, fertilizers and polymers. An integral part of “green” technologies is also the implementation of the NoWASTE concept, aimed at minimizing waste to be disposed of. Examples of non-waste technologies for the processing of aluminum waste at OOO NPF Metallon are given.

**Keywords.** “Green” technologies, non-waste production, new types of products.

**For citation.** Rumiantseva G. A., Nemenenok B. M., Arabey A. V., Tribushevskiy L. V. “Green” technologies in metallurgical production – a dream or reality? Foundry production and metallurgy, 2022, no. 4, pp. 63–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-63-69>.

Для металлургического производства характерно образование больших объемов техногенных отходов, которые оказывают 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].

Известные способы внедоменного (прямого) получения железа Midrex (США), HyL (Мексика), COREX (Фест Альпине), агрегат Круппа (Германия), ROMELT (Россия) позволяют получать губчатое железо или чугун без предварительной подготовки железной руды при использовании в качестве восстановителей конвертированного природного газа или газифицированного каменного угля [3].

Конверсия природного газа может быть кислородной (воздушной):  $\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2 + \text{Q}$ , паровой:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2 - \text{Q}$ , уголекислотной:  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2 - \text{Q}$ .

В случае паровой и уголекислотной конверсии для протекания реакции требуются затраты тепла. Установки прямого восстановления работают преимущественно в странах, располагающих дешевым сырьем (Индия, Мексика, Венесуэла, ЮАР). Наибольшее распространение получили способы MIDREX, Hy L. Способом MIDREX получают примерно  $\frac{2}{3}$  всего мирового производства железа прямого получения, а способом HyL – примерно  $\frac{1}{4}$  [3]. При этом следует отметить, что в составе отходящих газов также содержатся оксиды углерода.

Отходящие газы коксовых батарей, доменных печей и кислородных конвертеров, работающих на металлургических комбинатах полного цикла, эффективно используются на различных стадиях производства и при получении электроэнергии для собственных нужд.

Выделяющийся коксовый газ частично сжигается под сводом печи и коксование угля происходит при непосредственном контакте с горячим коксовым газом. Горячие отходящие продукты горения в дальнейшем используются для производства пара и электроэнергии (65 % энергии коксового газа) и подвергаются десульфурации перед сбросом их в атмосферу [4]. В США и Бразилии в последние годы по этой технологии построены пять экологически чистых заводов общей производительностью 6 млн. т высококачественного кокса в год.

Многолетний опыт производства собственной электроэнергии на промышленных предприятиях Российской Федерации (ОАО ММК, ОАО НОСТА, СПАК «Тулачермет», АОА «Северсталь», ОАО НЛМК и др.) огромен. Например, на крупнейшем металлургическом комбинате ОАО ММК уже десятки лет вырабатывается более 80 % электроэнергии, используемой у них в производстве [5].

При этом неизбежно регенерируются выбросы  $\text{CO}_2$ . За последние десятилетия структурные изменения в производстве стали, модернизация и инновации в энергетике, технологии и машиностроении, наглядным примером которых служит сталелитейная отрасль Германии, привели к резкому снижению удельного потребления энергии из первичных источников и удельных выбросов уголекислого газа. Только за период с 1990 г. расход энергии из первичных источников сократился на 13 %, а количество выбросов  $\text{CO}_2$  – 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 % [2].

Сталь является важнейшим материалом современного общества и по мере роста населения в мире и развития урбанизации ожидается дальнейший рост 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 % [6].

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, применяемая 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 CO<sub>2</sub> в атмосферу ожидается от реализации проекта пилотного завода HYBRIT для производства стали без использования природного топлива [6]. Внедрение новой технологии позволит уменьшить общие выбросы CO<sub>2</sub> в Швеции на 10% и 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.

На рис. 1 приведены данные по расходу материалов, электроэнергии и выбросам CO<sub>2</sub> на 1 т литой стальной заготовки на предприятиях черной металлургии Швеции в настоящее время и при реализации проекта HYBRIT [6]. Из рисунка видно, что объемы выделяющегося диоксида углерода снижаются с 1600 до 25 кг, где 20 кг CO<sub>2</sub> образуется при обжиге известняка.

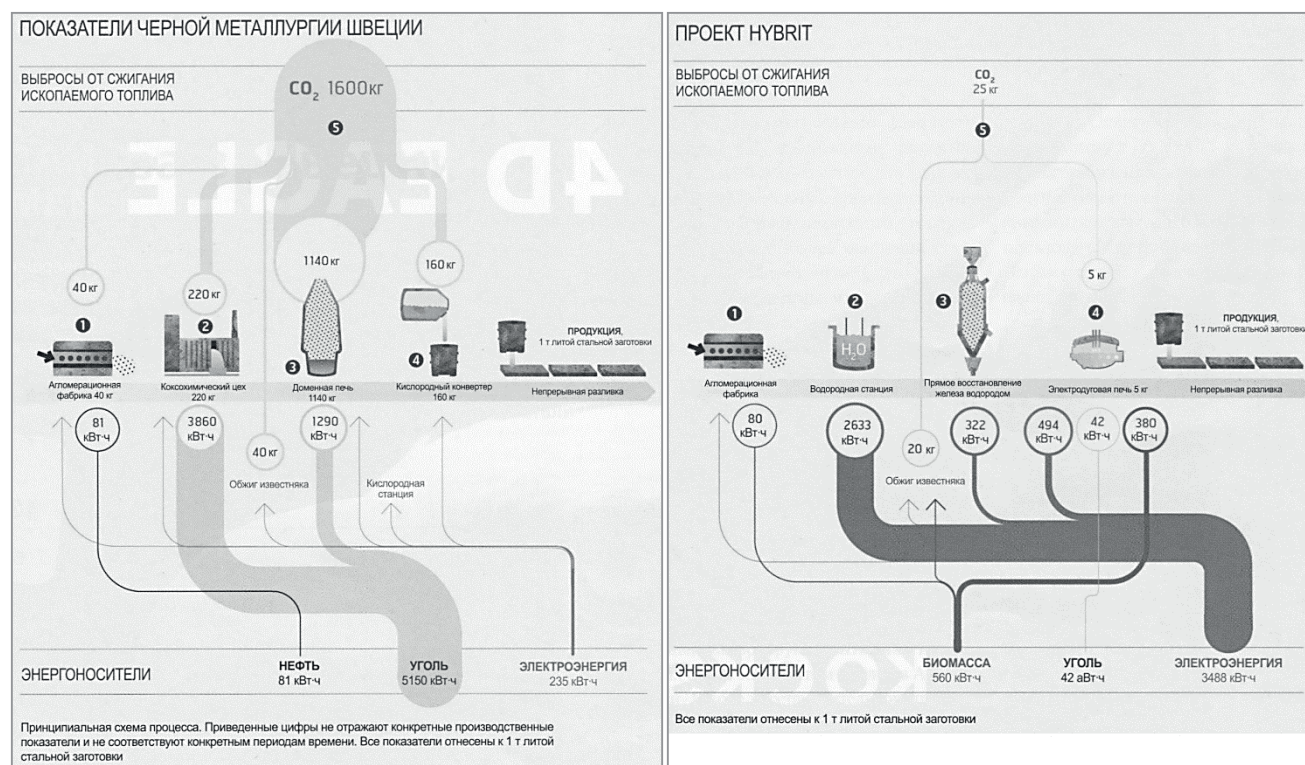


Рис. 1. Расход материалов, электроэнергии и выбросы CO<sub>2</sub> на 1 т литой стальной заготовки на предприятиях черной металлургии Швеции и при реализации проекта HYBRIT [6]

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 отказа от использования природного топлива.

Также заслуживает внимания технология, разработанная компанией Tata Steel, которая позволит в будущем сократить выбросы CO<sub>2</sub> металлургическими предприятиями как минимум на 20% [7]. 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.



На рис. 2 приведена схема процесса HIsarna. Он более эффективен, чем широко применяемая плавка в доменных печах, поскольку процесс не требует предварительной подготовки руды и кокса. Из традиционного технологического процесса можно исключить коксовые батареи, фабрики по производству агломерата и окатышей, что позволяет сэкономить большое количество энергии, улучшить экологическую ситуацию и сократить производственные расходы. Технология HIsarna позволяет расширить требования к качеству железной руды и угля, что дает возможность металлургическим компаниям производить сталь того же качества, используя более доступные шихтовые материалы. 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.

Проект HIsarna входит в число тех технических решений, которые помогут компании Tata Steel в достижении амбициозной цели по превращению сталеплавильного производства в нейтральное по выбросам оксида углерода к 2050 г. Для решения задачи по созданию в Европе крупнейшего зеленого водородного кластера к реализации проекта привлечена ведущая химическая компания Novycon и амстердамский порт. Совместно партнеры будут изучать возможность и осваивать производственные мощности по электролизу воды для получения кислорода и водорода на металлургическом заводе компании Tata Steel. Используя электроэнергию из возобновляемых источников, завод планирует уменьшить выбросы  $\text{CO}_2$  на 350 тыс. т/год, что эквивалентно выбросам более 40 тыс. жилых домов [7].

Планируется совместно с компанией Dow Chemical реализовать пилотный проект по преобразованию монооксида углерода в жидкую углеводородную смесь, которая может быть использована в качестве сырья при производстве химической продукции, что будет служить примером безотходной технологии.

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 и азота – 71,5% [8]. 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 тепла 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 ни о каком сокращении  $\text{CO}_2$  [2].

Наряду с выработкой тепла 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.

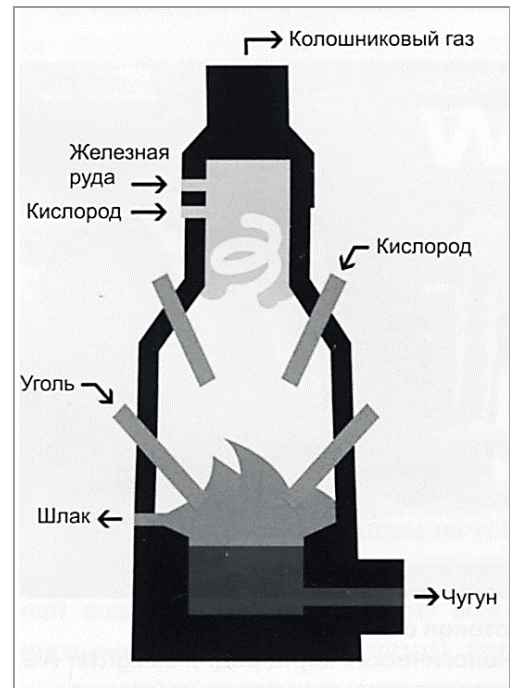


Рис. 2. Схема процесса HIsarna [7]

Группа ArcelorMittal совместно с компанией Lanzatech успешно продемонстрировала возможность ферментации доменного газа при помощи микробов с получением этанола. Из объема 100 тыс. м<sup>3</sup> в час (при нормальных условиях) из доменного газа (из которого вымывается CO<sub>2</sub>), 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 °С [2].

«Зеленые» технологии металлургического производства предполагают также исключение образования отходов, подлежащих захоронению. В Германии, например, была 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. Придерживаясь данной концепции, в настоящее время большая часть шлаков внепечной обработки используется в качестве шлакообразующих добавок в ЭДП [2]. При этом не требуются площади для их захоронения, улучшится экологическая ситуация из-за исключения распространения на большую территорию экотоксичных материалов, экономится первичное сырье в виде извести и бокситов.

Ряд безотходных технологий, реализуемых на ООО «НПФ «Металлон» по переработке окисленных отходов алюминия и отходов алюминия 4-го сорта класса Г, также можно отнести к «зеленым» технологиям в металлургическом производстве (рис. 3, 4).

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

Переработка отходов алюминия 4-го сорта класса Г 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.

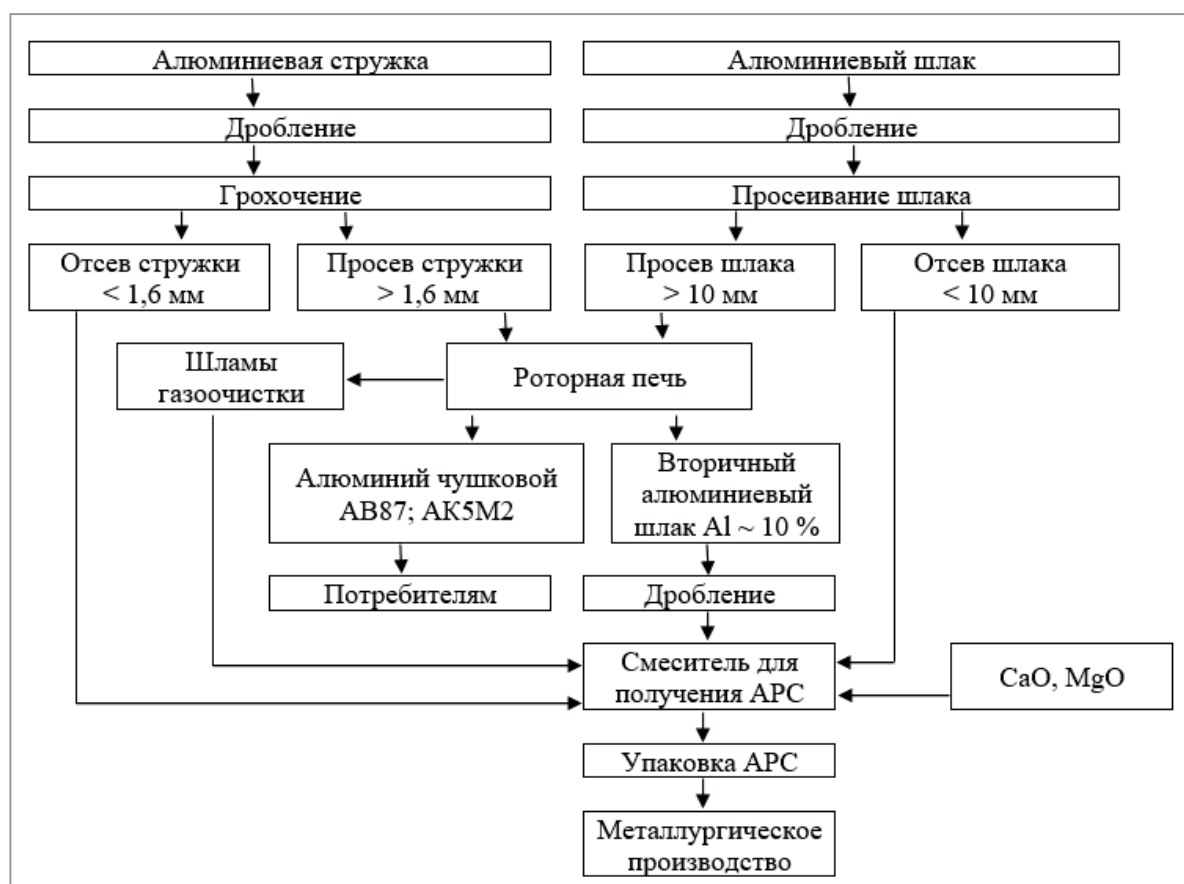


Рис. 3. Схема безотходной технологии переработки окисленных отходов алюминия в виде стружки и шлака

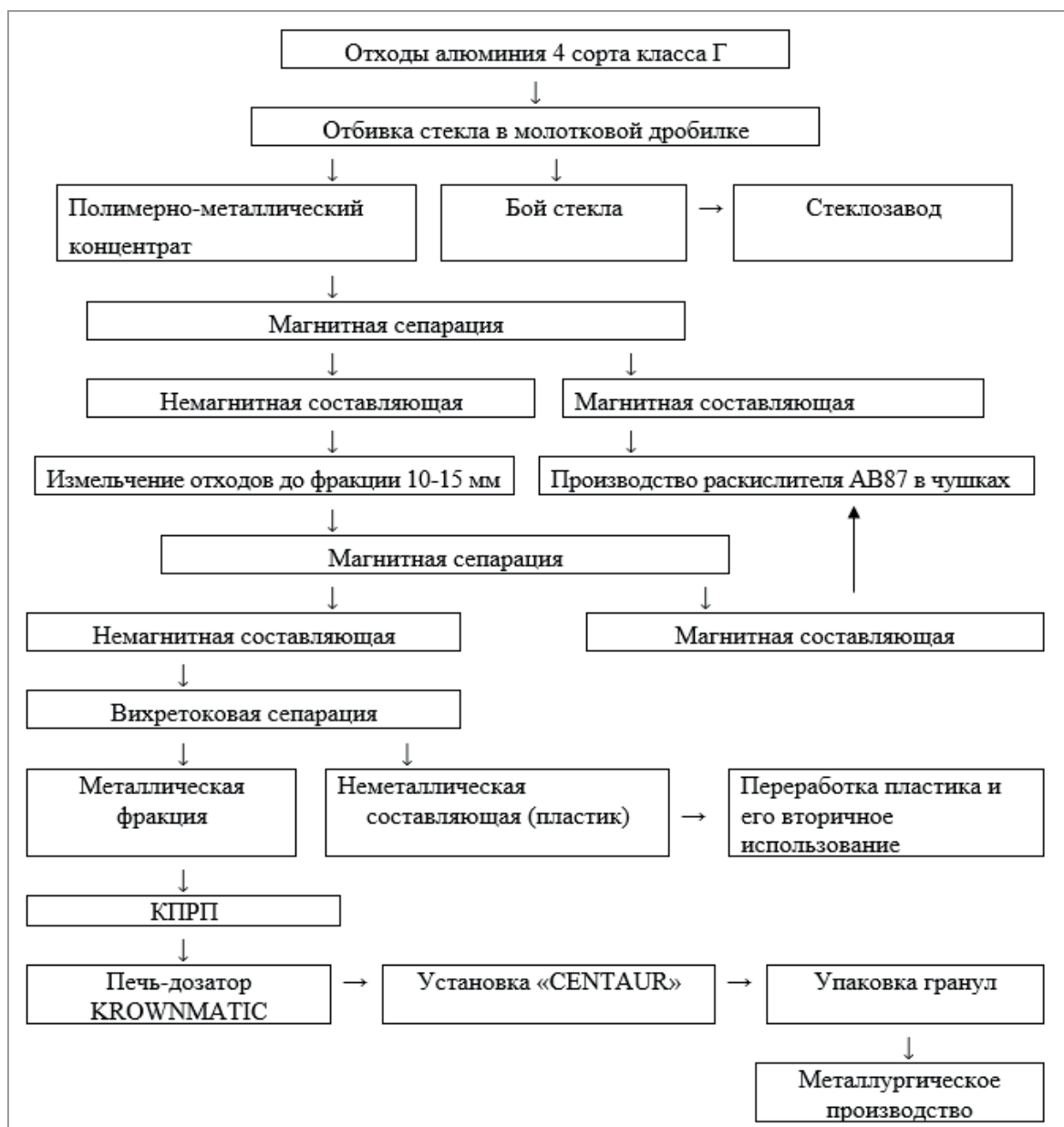


Рис. 4. Схема подготовки и переработки отходов алюминия 4-го сорта класса Г

## 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. **Шульц, Л.А.** Наилучшие доступные технологии как основа повышения энергоэкологической эффективности производства стали на металлургических заводах / Л.А. Шульц, А.Г. Юдин // Экология и промышленность России. 2013. С. 52–57.
5. **Подгородецкий, Г.С.** Современные направления развития и повышения энергоэкологической эффективности черной металлургии / Г.С. Подгородецкий, Л.А. Шульц // Экология и промышленность России, 2016. Т. 20. № 4. С. 46–52.
6. **HYBRIT: металлургическое производство без использования природного топлива в Швеции** // Металлургическое производство и технология. 2018. № 2. С. 8–11.
7. **Новая технология HIsarna компании Tata Steel повышает надежды на более экологичное металлургическое производство** // Металлургическое производство и технология. 2019. С. 36–39.
8. **Кривандин, В.А.** Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / В.А. Кривандин, Ю.П. Филимонов. М.: Металлургия, 1986. Т. 1. 479 с.

## REFERENCES

1. **Bely O.A., Nemenenok V.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 Kh. B., Shprekher M.** Gibkiye resheniya v staliliteynoy 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 = Black metals*, 2017, no. 11, pp. 64–71.
4. **Shulz L.A., Ydin A. G.** Nailuchshie dostupnye tekhnologii kak osnova povysheniya energo-ekologicheskoy effektivnosti proizvodstva stali na metallurgicheskikh zavodakh [Best available technologies as a basis for improving the energy and environmental efficiency of steel production at metallurgical plants]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2013, march, pp. 52–57.
5. **Podgorodezky G.S., Shulz L.A.** Sovremennyye napravleniya razvitiya i povycheniya energo-ekologicheskoy effektivnosti chernoy metallurgii [Modern directions of development and improvement of energy and environment of the steel industry]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 46–52.
6. HYBRIT: metallurgicheskoe proizvodstvo bez ispol'zovaniya prirodnogo topliva v Chvezii [Metallurgical production without the use of fossil fuels in Sweden]. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya = Metallurgical production and technology*, 2018, no. 2, pp. 8–11.
7. Novaya tekhnologiya HIsarna Kompanii Tata Steel povychaet nadezhdy na bolee ekologichnoe metallurgicheskoe proizvodstvo [Tata steel's new HIsarna technology raises hopes for greener steel production]. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya = Metallurgical production and technology*, 2019, pp. 36–39.
8. **Krivandin V.A., Filimonov Yu. P.** *Teoriya, konstruktssii i raschety metallurgicheskikh pechey* [Theory, design and calculations of metallurgical furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, vol. 1, 479 p.