



Декарбонизация

стальной отрасли:

вызов на ближайшие десятилетия

Спонсор исследования



Стратегическое видение Группы Метинвест основано на принципах устойчивого развития, обеспечивающих сбалансированность вопросов экономики, социального прогресса и ответственности за окружающую среду. Сегодня во всем мире на первое место по значимости выходит борьба с изменением климата и декарбонизация экономики. Это сложная задача, для выполнения которой нет однозначного алгоритма. Поэтому Группа Метинвест решила внести свой вклад в поиск возможных путей декарбонизации украинской металлургии и украинской экономики в целом и стала спонсором исследования «Декарбонизация стальной отрасли: вызов на ближайшие десятилетия».

Партнер исследования



HORST WIESINGER
CONSULTING

Глубокое изучение технологий декарбонизации, их особенностей, возможных последствий для отрасли стало возможным благодаря привлечению к выполнению данного исследования австрийской консалтинговой компании Horst Wiesinger Consulting в качестве партнера. Экспертиза специалистов Horst Wiesinger Consulting позволила системно подойти к изучению такого сложного вопроса как декарбонизация стальной отрасли. Horst Wiesinger Consulting обладает значительным опытом реализации проектов повышения энергоэффективности в производстве стали. Также компания является консультантом R&D проектов.

4	Хорст ВИЗИНГЕР: «Декарбонизация – это вызов на ближайшие десятилетия»
5	Юрий РЫЖЕНКОВ: «Декарбонизация металлургии – это драйвер декарбонизации других отраслей»
6	Металлургия стремится достигнуть углеродной нейтральности
7	Декарбонизация металлургии требует новых технологий
10	Технологии безуглеродного производства – на стадии разработки
20	Ряд сложностей ограничивает возможности декарбонизации
21	Декарбонизация требует значительных инвестиций
22	Декарбонизация ведет к росту себестоимости производства
24	Компании отрасли активно инвестируют в R&D
37	Компании отрасли поставили амбициозные цели по сокращению выбросов
38	В 2050-2070 стальная отрасль кардинально изменит свой облик
41	Украина – активный участник процесса декарбонизации
44	О Группе Метинвест
46	Станислав ЗИНЧЕНКО: «Украине следует использовать все лучшие практики в политике декарбонизации»
47	Контактная информация

Хорст ВИЗИНГЕР: «Декарбонизация – это вызов на ближайшие десятилетия»



Доктор Хорст Визингер,
основатель и руководитель
Horst Wiesinger Consulting,
глава наблюдательного
совета GMK Center

На протяжении уже 50 лет металлургическая промышленность находится под давлением экологических проблем. Сначала озабоченность вызывали видимые загрязнения (дым, пыль). Это видно на примере первых официальных правил, касающихся качества воздуха, принятых в Германии в 1964 году. Эти инструкции установили предельные ограничения выбросов для пыли, диоксида серы, оксидов азота и других соединений. Выполнение документа было обязательным только в Германии, но многие европейские страны также решили следовать его рекомендациям.

Интерес общества к экологическим проблемам существенно возрос после аварий на химических заводах. В июле 1976 года случилась катастрофа на заводе в Севезо (Италия) – в результате производственного сбоя произошел выброс диоксинов. В декабре 1984 года на заводе в Бхопале (Индия) произошел выброс ядовитых газов – в день аварии погибло 3 тысячи человек.

После этих событий Еврокомиссия приступила к сбору экологических данных о промышленном производстве. В результате в 1996 году появилась Директива ЕС о комплексном предотвращении загрязнения и борьбе с ним. В 2008 году введена в действие новая версия этой директивы. Основная идея документа состоит в получении разрешений на выбросы, причем такое разрешение может выдаваться только при условии, что деятельность завода полностью соответствует «лучшим доступным технологиям». «Лучшие доступные технологии» описаны для всех отраслей, включая металлургию. Недостатком «лучших доступных технологий» можно считать отсутствие требований по выбросам CO₂, которые приобретают все большую значимость.

В рамках реализации Парижского соглашения ЕС движется к безуглеродной экономике. В 2021 году ожидается завершение дискуссии о возмож-

ных целях и инструментах снижения выбросов CO₂, чтобы впоследствии приступить к трансформации экономики. **Доказательством результативности дискуссии служит заключение «Европейской зеленой сделки» (European Green Deal).** Она предполагает, что экономика ЕС станет углеродно нейтральной к 2050 году.

Достижение этой амбициозной цели возможно только при условии взаимодействия предприятий и государства. Технологии, способные полностью исключить выбросы CO₂, находятся на зачаточном уровне развития и представлены преимущественно отдельными разработками и научно-исследовательскими проектами. **В металлургии первое внедрение прорывных технологий в промышленных масштабах может случиться не ранее 2035 года.**

Главной проблемой остается финансирование декарбонизации. Для предприятий декарбонизация – это в первую очередь рост капитальных инвестиций. ЕС готов частично компенсировать эти расходы в рамках «Европейской зеленой сделки», понимая, что без государственной поддержки такие глобальные проекты невозможны.

Также очевидно, что **декарбонизация приведет к росту себестоимости производства** и, как следствие, к утрате конкурентоспособности европейскими производителями. **Для решения этой проблемы ЕС планирует ввести Carbon Border Adjustment Mechanism**, которым будет облагаться импорт продукции, произведенной с более высокими выбросами CO₂ и более низкой, чем в ЕС, платой за выбросы.

Установленная цель по сокращению выбросов CO₂ на 80% может быть достигнута только при условии полной вовлеченности мирового промышленного сообщества. Очевидно, что эта цель может быть достигнута только путем применения последовательного и целостного подхода, и для этого потребуется довольно длительный переходный период. ■

Юрий РЫЖЕНКОВ: «Декарбонизация металлургии – это драйвер декарбонизации других отраслей»



Юрий Рыженков,
Генеральный директор Группы Метинвест

Металлургическая отрасль будет играть ключевую роль в достижении Украиной углеродной нейтральности. Как крупнейший производитель стали в стране Метинвест четко осознает свою ответственность за этот процесс. Мы уверены: именно наша Группа станет лидером в декарбонизации украинской промышленности и примером для остальных на пути к этой важнейшей цели.

Охрана окружающей среды – одна из главных ценностей группы Метинвест. В течение многих лет мы работаем над обеспечением современного, энергоэффективного и экологически чистого производства на наших активах. За 15 лет своего существования Метинвест вложил в проекты по охране окружающей среды 80 млрд грн. При этом мы ежегодно наращиваем инвестиции в данном направлении. Например, в 2020 году каждый третий доллар наших инвестиций был направлен на экологические проекты. Это дает свои результаты – мы постепенно снижаем воздействие на окружающую среду, внося свой вклад в борьбу с изменением климата.

Меры, принимаемые Группой, направлены на снижение воздействия на окружающую среду на всех этапах производственного процесса. Для этого Метинвест применяет комплексный подход к автоматизации охраны окружающей среды, позволяющий управлять экологическими показателями и рисками в среднесрочной и долгосрочной перспективе, унифицировать экологические бизнес-процессы, прогнозировать и заблаговременно выявлять потенциальные экологические риски.

Наши усилия в направлении охраны окружающей среды нашли высокие оценки со стороны международного сообщества. Так, Метинвест входит в 10 лучших металлургических компаний мира с точки зрения экологических рисков.

Группа Метинвест – глобальный игрок, и мы работаем в соответствии с лучшими мировыми практиками. Поэтому, декларируя стратегические цели по декарбонизации и достижению углерод-

ной нейтральности, мы обязаны стать лидером этих процессов.

Достижение углеродной нейтральности – это сложная задача, решение которой требует полной перестройки производственных процессов. При этом технологии, которые позволяют это сделать, **находятся только на этапе разработки**. Для того, чтобы повысить устойчивость нашего бизнеса, мы намерены участвовать в R&D проектах, которые занимаются созданием и внедрением новых технологий декарбонизации.

Сейчас Метинвест разрабатывает 10-летнюю дорожную карту по сокращению выбросов CO₂. Мы очень тщательно подходим к проработке каждого шага, который в перспективе приведет наше производство к углеродной нейтральности. Столь масштабная трансформация не должна повредить устойчивости нашего бизнеса. Понимая, что Метинвест – крупнейший работодатель и налогоплательщик, помимо технологических решений, мы прорабатываем вопросы, связанные с интересами таких групп стейкхолдеров как наши сотрудники и местные сообщества.

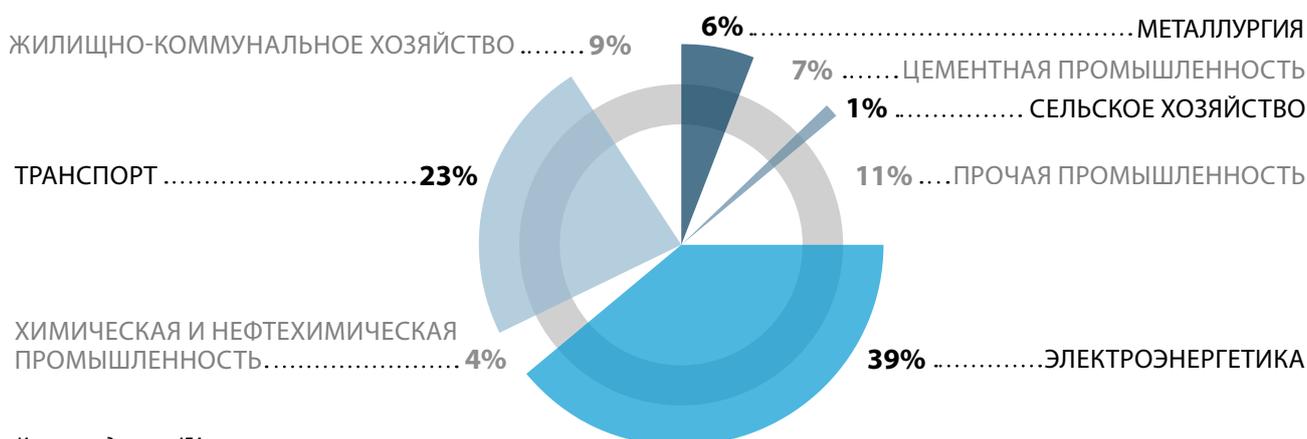
Декарбонизация несет в себе ряд вызовов для металлургических компаний. Для того, чтобы все стейкхолдеры понимали потребности бизнеса, возможные риски и последствия декарбонизации, мы считаем важным **повысить информированность вовлеченных в этот вопрос сторон**. Поэтому, Метинвест выступил спонсором данного исследования.

Повышение информированности будет способствовать улучшению коммуникаций и взаимодействия, в том числе между бизнесом и государством. Только в таком ключе возможно построение новых «зеленых» производств и новой экономики. Металлурги производят сталь для мачт ветрогенераторов, новые легкие сплавы для автомобилей, конструкции для строительства. Поэтому успешная декарбонизация металлургии – это драйвер декарбонизации других отраслей. ■

Металлургия стремится достигнуть углеродной нейтральности

Парижское соглашение, принятое в 2015 г., стало поворотным моментом в глобальной экологической и экономической политике. Стороны, подписавшие соглашение, согласились сократить до нуля выбросы парниковых газов, связанные с жизнедеятельностью человека, уже в этом столетии. Эта цель меняет подход к экономической политике, так как предусматривает коренную перестройку бизнес-моделей, технологий, цепочки поставок, условий конкуренции в ряде отраслей. Сильнее всего поставленные цели отразятся на энергетике, транспорте, ЖКХ, так как это отрасли с наибольшим объемом выбросов CO₂. Эти три отрасли суммарно занимают 71% в общем объеме выбросов. Metallургия в этом списке находится только на шестом месте с долей в выбросах всего 6%.

Структура глобальных выбросов CO₂ в 2019 г. в разрезе отраслей



Источник данных: IEA

2,27
Гт CO₂

прямые выбросы
металлургии
в 2019 г.

1,83
т CO₂

удельные выбросы
на тонну стали
в 2019 г., прямые
и непрямые

Источник данных: IEA

По данным IEA, глобальный объем прямых выбросов CO₂ металлургической отрасли в 2019 г. составлял 2,27 гига тонн. Это объем выбросов, непосредственно связанных с процессом производства стали. Средние удельные прямые выбросы CO₂ на тонну стали – 1,21 т CO₂ на тонну стали. По данным IEA, средние удельные непрямые выбросы, то есть выбросы связанные с генерацией энергии в процессе производства, составляют 0,62 т. То есть суммарные выбросы на тонну стали в 2019 г. – 1,83 т, что соответствует данным World Steel Association.

Металлургия испытывает давление в отношении сокращения выбросов как со стороны государства, которое устанавливает соответствующие цели, так и со стороны потребителей и инвесторов.

Глобальность цели подразумевает снижение выбросов по всей производственной цепочке. Поэтому ряд потребителей, например автопроизводители, требуют «зеленую» продукцию. В результате формируется новая «эконормальность», которая в перспективе будет имплементирована в производственные стандарты.

Жесткие цели по снижению выбросов могут навредить устойчивости бизнеса металлургических компаний в долгосрочной перспективе. Поэтому финансовые организации требуют от бизнеса четкого понимания их планов по переходу к безуглеродному производству.

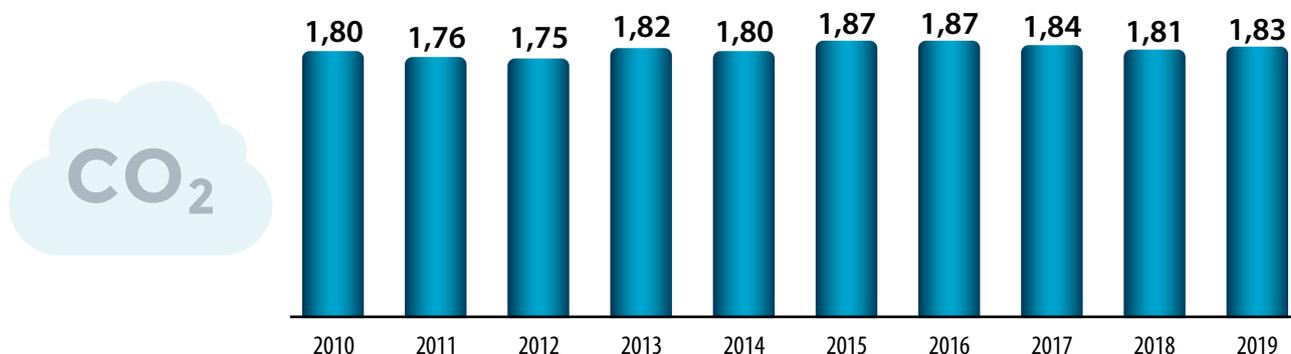
Такое давление создает риски для бизнеса металлургических компаний, поскольку возможности по снижению выбросов в отрасли ограничены. Поэтому производители стали должны разработать стратегии декарбонизации, чтобы адаптироваться и остаться на рынке. ■

Декарбонизация металлургии требует новых технологий

Потенциал снижения выбросов CO₂ в металлургической отрасли ограничен. Несмотря на применяемые политики, средний объем удельных выбросов сохраняется на уровне 1,8 т в течение последних 10 лет.



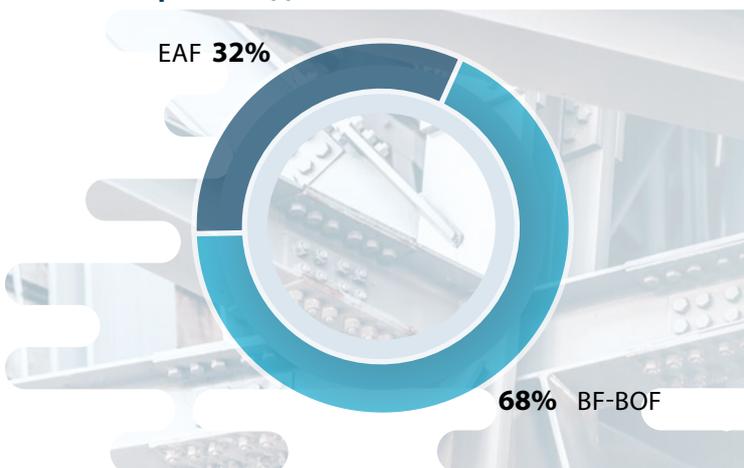
Средние удельные выбросы CO₂ на тонну стали в мире (прямые и непрямые), т



Источник данных: WSA

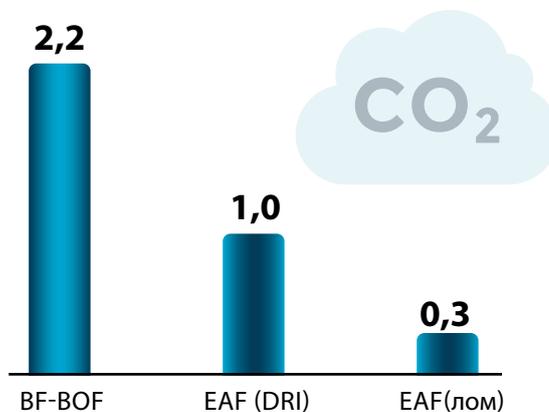
Этот факт можно объяснить спецификой производственных мощностей и используемых технологий. В отрасли 68% установленных мощностей представлены традиционной технологией доменная печь – конвертер (BF-BOF). Еще около 32% мощностей приходится на электросталеплавильную технологию (EAF). Выбросы парниковых газов при конвертерной технологии существенно выше. >>>

Структура мощностей в разрезе основных технологий производства стали, %



Источник данных: OECD

Удельные выбросы CO₂ на тонну стали в разрезе основных технологий производства стали, т

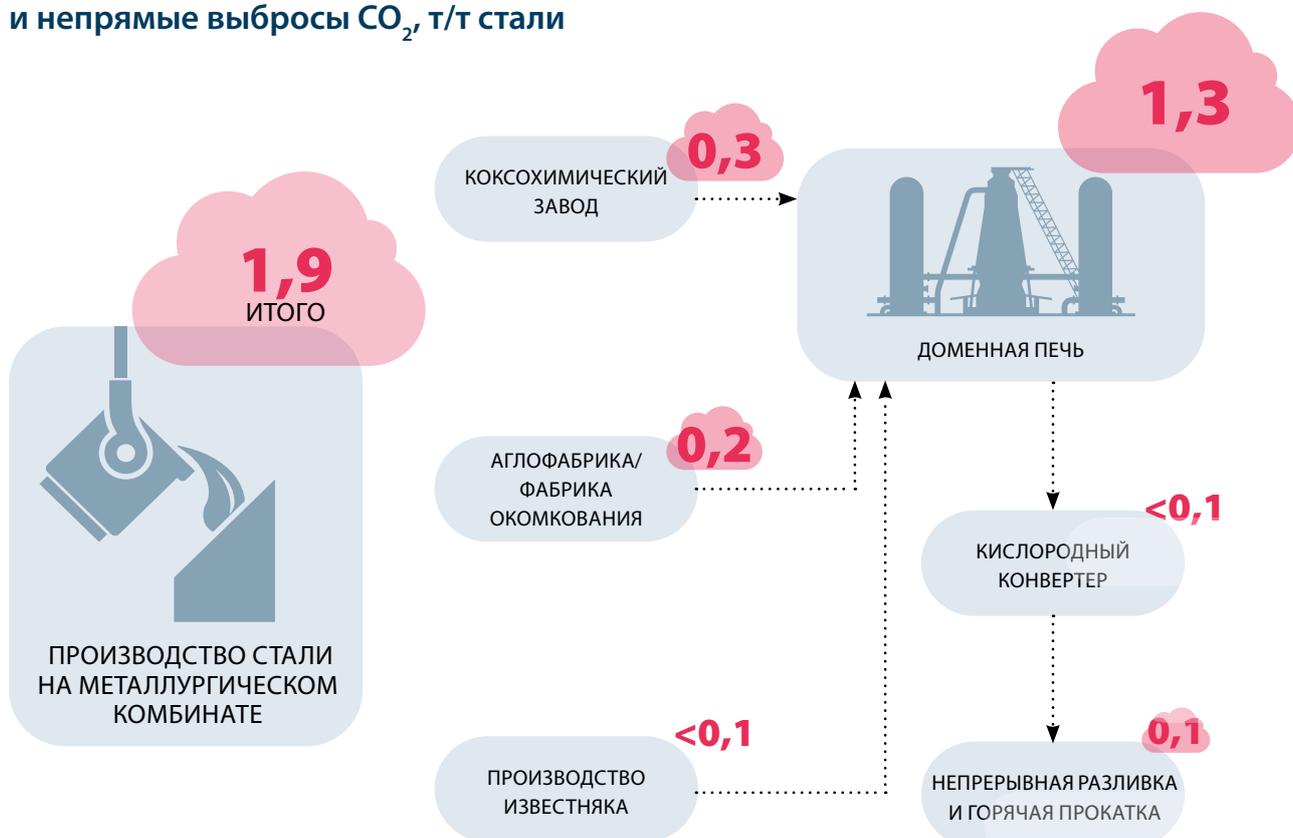


Источник данных: WSA

Причиной более высоких выбросов при технологии доменная печь – конвертер является использование угля (в виде кокса или сырья для установок ПУТ) и природного газа. Уголь и газ являются источниками углерода. В процессе производства стали на металлургических комбинатах углерод играет важную роль. Во-первых, это восстановительный агент в доменной печи, который высвобождает кислород из железной руды, что необходимо для производства чугуна. Во-вторых, углерод является источником энергии, которая позволяет достичь высокой температуры, необходимой для выплавки стали. В-третьих, углерод – необходимый компонент стали (до 1% в составе высокоуглеродных марок).

Ключевым источником выбросов CO₂ на металлургическом предприятии, работающем по технологии BF-BOF, является доменное производство – 68% общего объема прямых выбросов.

Источники выбросов CO₂ на интегрированных металлургических предприятиях (BF-BOF) на примере заводов ЕС, средние удельные прямые и не прямые выбросы CO₂, т/т стали

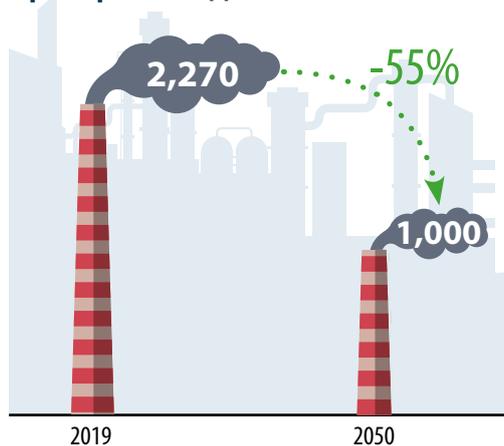


Источник данных: University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership

В доменном производстве выбрасывается 1,3 т CO₂ на тонну стали. В доменной печи происходит непосредственное восстановление железа из железной руды. На втором месте по выбросам CO₂ – коксохимический завод (0,3 т CO₂ в расчете на тонну жидкой стали). Выбросы CO₂ коксохимического завода связаны с высокотемпературным нагреванием коксующегося угля, который на 100% состоит из углерода. На третьем месте по выбросам углекислого газа – фабрики агломерации и окомкования (0,2 т CO₂ в расчете на тонну жидкой стали). То есть конвертерная технология не имеет значительного потенциала снижения выбросов.

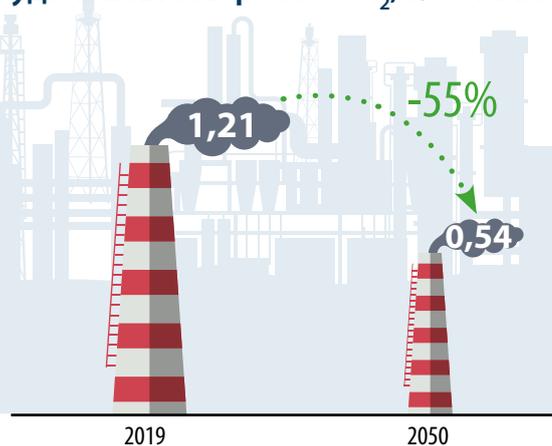
По данным IEA, для достижения целей карбонной нейтральности к 2070 г. отрасль до 2050 г. должна добиться снижения выбросов на 55%. Консалтинговая компания World Steel Dynamics прогнозирует, что объем производства стали в 2050 г. сохранится на уровне 2019 г. – 1,85-1,87 млрд т. Это означает, что к 2050 г. удельные выбросы парниковых газов при производстве стали должны снизиться также на 55%.

Объем прямых выбросов CO₂ при производстве стали, Гт



Источник данных: IEA

Среднее значение прямых удельных выбросов CO₂, т/т стали



Источник данных: IEA, расчеты GMK Center

По данным ведущей инжиниринговой компании Primetals, использование существующих лучших практик позволит снизить выбросы не более чем на 25-30%. Этого недостаточно для того, чтобы достигать необходимых целей по снижению выбросов. Для безуглеродного производства нужны новые технологии, которые пока находятся только на этапе разработки. ■



Технологии безуглеродного производства – на стадии разработки



В зависимости от потенциала декарбонизации различают технологии, снижающие выбросы CO₂, и технологии, позволяющие достичь углеродной нейтральности. Технологии, снижающие выбросы CO₂, уже доступны для промышленного использования, тогда как технологии углеродной нейтральности находятся на разных стадиях R&D.





Технологии, снижающие выбросы CO₂

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Для повышения энергоэффективности требуется улучшение работы оборудования и постепенное его обновление согласно имеющимся наилучшим доступным технологиям (best available technology, BAT). По оценкам IEA, за счет улучшения операционной эффективности можно сэкономить около 20% энергозатрат в пересчете на тонну стали, что также принесет положительный экономический эффект.

BAT включают:

- а) технологии, направленные на использование в производственных процессах избыточной энергии, которая обычно выделяется в окружающую среду;
- б) технологии, снижающие использование топлива в производстве стали;
- в) технологии, позволяющие получать электроэнергию из избыточного тепла.

Возможные способы повышения энергоэффективности металлургического производства, по данным IEA:

- **установка систем утилизации отходящего тепла.** Позволяет снизить энергопотребление на всех этапах производственного процесса;
- **сухое тушение кокса.** Позволяет использовать тепло от горячего кокса, выходящего из коксовых

печей, для выработки электроэнергии, а также снизить расход топлива коксовыми печами. Кроме того, при сухом тушении улучшается качество производимого кокса;

- **установка турбин с рекуперацией верхнего давления,** которые используют давление и тепло доменного газа для производства электроэнергии. Благодаря такой установке можно получать 30-40 кВт·ч электричества на каждой тонне чугуна при использовании системы мокрой пылеочистки отходящих газов (объем генерации электроэнергии можно увеличить до 50-60 кВт·ч при использовании сухого пылеудаления).

Качество исходного сырья – дополнительный фактор эффективности производственных процессов. Например: чем выше содержание железа в железорудном сырье или чем выше уровень агломерирования ЖРС до введения в доменную печь, тем меньше потребуется энергии для восстановления железа из руды.

Еще одним способом снизить энергопотребление является добавление лома в состав шихты. Однако широкое использование этой стратегии сдерживается из-за ограниченности доступных запасов лома.

ЗАМЕНА КОКСА И ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Древесный уголь

Первоначально для выплавки чугуна использовался древесный уголь. Каменноугольный кокс начали применять в XVIII в. после изобретения технологии коксования (выплавка чугуна на основе каменного угля оказалась невозможной, так как получаемый металл содержал много вредных примесей – серы и фосфора).

В настоящее время древесный уголь для выплавки чугуна используется в Бразилии. Местные металлургические компании на специальных плантациях выра-

щают эвкалипт, а затем производят из него древесный уголь. На место вырубленных деревьев сразу высаживаются новые саженцы. Срок возобновляемости эвкалиптового ресурса – 6-7 лет. За это время дерево вырастает до 12 м в высоту, а диаметр ствола достигает 200 мм.

Для производства чугуна бразильские предприятия используют минидоменные печи. Хрупкость древесного угля не позволяет его использовать в больших доменных печах, которые

более энергоэффективны.

Из преимуществ древесного угля следует отметить низкую зольность, высокое качество получаемого чугуна (низкое содержание серы и фосфора, а также отсутствие примесей титана, хрома, цинка, поступающих из золы кокса), низкий выход шлаков (120-150 кг/т чугуна по сравнению с 230-300 кг/т при производстве с использованием кокса).

Использование древесного угля вместо кокса позволяет снизить выбросы CO₂ на 32-58%. ►►

Схема процесса Torero



Замена кокса древесным углем подходит не для всех регионов. Во-первых, не везде доступно выращивание подходящих лесных ресурсов. Во-вторых, большие размеры существующих доменных печей не позволяют использовать древесный уголь. В-третьих, переход на малые доменные печи приведет к росту энергозатрат и снижению конкурентоспособности.

ArcelorMittal развивает проект Torero, который предлагает заменить пылеугольное топливо, вдуваемое в доменную печь, биоуглем, получен-

ном из древесных отходов.

Выбрасываемый монооксид углерода (CO) планируется использовать для производства биоэтанола – по технологии проекта Steelanol (ферментация с использованием бактерий).

Демонстрационная установка Torero строится на заводе ArcelorMittal в Генте (Бельгия). Инвестиции в проект – €40 млн, в том числе €11,5 млн – от программы EU Horizon2020. На демонстрационной установке планируется перерабатывать 120 тыс. т древесных отходов в год.

Синтез-газ

IGAR (Injection de Gaz Réformé) – проект ArcelorMittal. Он нацелен на улавливание CO_2 из доменной печи и превращение его в синтез-газ, который может вводиться в доменную печь для восстановления железа.

Такой подход позволяет сократить выбросы углекислого газа двумя путями:

- во-первых, за счет улавливания CO_2 ;
- во-вторых, за счет использования CO_2 в сталеплавильном производстве (полученный из CO_2 синтез-газ частично замещает кокс, соответственно, снижается потребность в производстве кокса и добыче угля).

По предварительным расчетам, IGAR потенциально способен снизить выбросы металлургического завода на 0,1-0,3 т CO_2 в расчете на тонну жидкой стали.

Синтез-газ состоит из двух компонентов – монооксид углерода (CO) и водород (H_2). Для получения этих компонентов используется процесс сухого риформинга – смесь CO_2 и природного газа (CH_4) нагревают до очень высокой температуры, используя «плазменный факел» (plasma torch). В перспективе ArcelorMittal рассчитывает использовать вместо природного газа биогаз или отходы пластика. А перевод «плазменного факела» на альтернативные источники электроэнергии позволит еще больше сократить выбросы CO_2 .

В 2017 г. IGAR прошел стадию лабораторных испытаний. В 2021-2022 гг. запланирован запуск пилотной установки на заводе ArcelorMittal в Дюнкерке (Франция). Проект поддерживает правительство – French Environment and Energy Management Agency (ADEME). Инвестиции в проект IGAR – €20 млн.

Схема процесса IGAR



Водород

Вместо угля/кокса в доменную печь можно подавать водород. Водород, как и углерод, способен восстанавливать железо из руды. Преимущество водорода состоит в том, что при его использовании выделяется водяной пар вместо CO_2 . Согласно оценкам Primetals, **потенциал снижения выбросов углекислого газа за счет вдувания водорода в доменную печь – до 20%**. В настоящее время эта технология тестируется.

ThyssenKrupp начала использовать водород в доменной печи вместо пылеугольного топлива. В ноябре 2019 г. провели первый тест, в рамках которого водород вдували в одну из 28 фурм на доменной печи №9 в Дуйсбурге (Германия).

В феврале 2021 г. компания завершила первый этап испытаний и заявила о готовности провести в 2022 г. тестирование на всех 28 фурмах доменной печи. Сроки испытаний сдвинулись из-за пандемии COVID (ранее планировалось к 2022 г. распространить использование водорода на три остальных домны).

Бюджет проекта – €2,7 млн, 40% из которых профинансировано правительством земли Северный Рейн – Вестфалия. Расход водорода на тонну чугуна – 11,7 кг (131 м³).

Водород для проекта поставляет Air Liquide – ми-

ровой лидер в сфере производства промышленных газов. На первом этапе испытаний водород поставлялся грузовым транспортом, на втором этапе потребуется строительство трубопровода для водорода. Использование водорода позволит снизить выбросы CO_2 в расчете на тонну чугуна на 19%.

ThyssenKrupp заключила партнерство с RWE для совместного производства «зеленого» водорода. Ожидается, что водород от установки электролиза RWE начнет поставляться в середине 2020-х гг. К этому же времени компания намерена построить завод по производству DRI.

Также ThyssenKrupp договорился с энергетической компанией STEAG для составления технико-экономического обоснования строительства завода по электролизу воды для производства водорода. Установку планируется построить на производственной площадке STEAG в Дуйсбурге. На первом этапе водород планируется использовать в доменных печах, в дальнейшем – для производства DRI. Мощность проектируемого завода (500 МВт, 75 тыс. т «зеленого» водорода в год) сможет покрыть потребности завода по производству DRI, который ThyssenKrupp планирует построить к 2025 г.

ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОМА (РЕСАЙКЛИНГ) И РОСТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОМА В КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Сталь – материал, который хорошо поддается вторичной переработке. В настоящее время в среднем 85% стали из использованной продукции передается на ресайклинг, при этом уровень утилизации значительно варьирует в зависимости от источника лома – от 50% для конструкционной арматурной стали до 97% для промышленного оборудования.

Лом – основное сырье для электродуговых печей. В то же время он может использоваться и в кислородно-конвертерном производстве стали, повышая его энергоэффективность. В кислородно-конвертерном и мартеновском производстве можно использовать в составе шихты до 30% лома. Это позволяет снизить выбросы CO_2 по цепочке «домен-

ная печь – конвертер» на 3%.

Производство стали из лома в электропечах позволяет сократить расход энергии на 55-60% по сравнению с производством из железной руды. Поэтому выбросы CO_2 при электродуговом способе производства (0,3 т CO_2 на тонну стали) значительно меньше, чем при производстве по цепочке «доменная печь – конвертер» (2,2 т CO_2 на тонну стали).

Доступность лома – фактор, ограничивающий развитие электросталеплавильного производства. Согласно прогнозам Worldsteel, **объемы доступного лома будут расти и достигнут 1 млрд т в 2030 г. и 1,3 млрд т в 2050 г.** Соответственно, развитие электросталеплавильного производства потребует увеличения

объемов заготовки лома, а также совершенствования методов его сортировки. Особенно острой является проблема удаления примесей меди, которая ухудшает качество стальных продуктов.

Для успешной декарбонизации электросталеплавильного производства также необходим переход на возобновляемые источники электроэнергии. Этот шаг позволит исключить выбросы CO_2 , связанные с генерацией электроэнергии.

Направление, связанное с использованием лома в сталелитейном производстве, развивают в рамках совместного проекта ArcelorMittal и SMS group – ПЕМ (Primary energy melter). В основу проекта положена технология плавения низкокачественного лома с использованием метал-

лургического или природного газа. Первая установка РЕМ запущена на заводе в Генте в 2012 г.

Технология РЕМ позволяет увеличить использование лома в кислородном конвертере за счет того, что лом подается в расплавленном состоянии и поэтому не требуется дополнительной энергии для его нагрева.

РЕМ в кислородно-конвер-

терном производстве позволяет сократить выбросы CO₂ за счет:

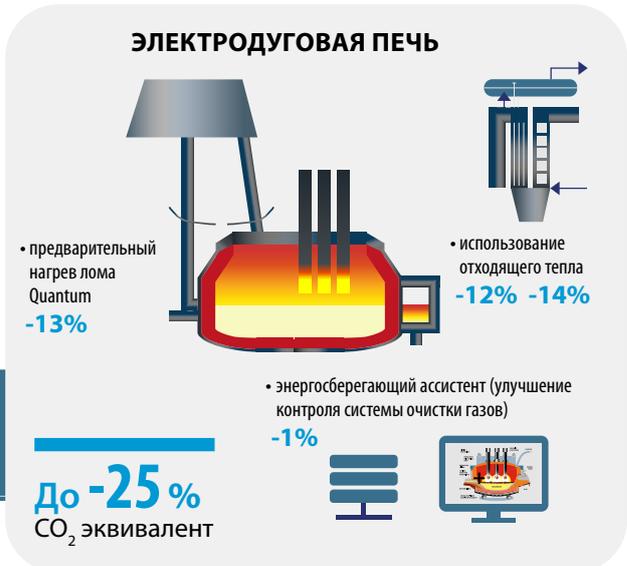
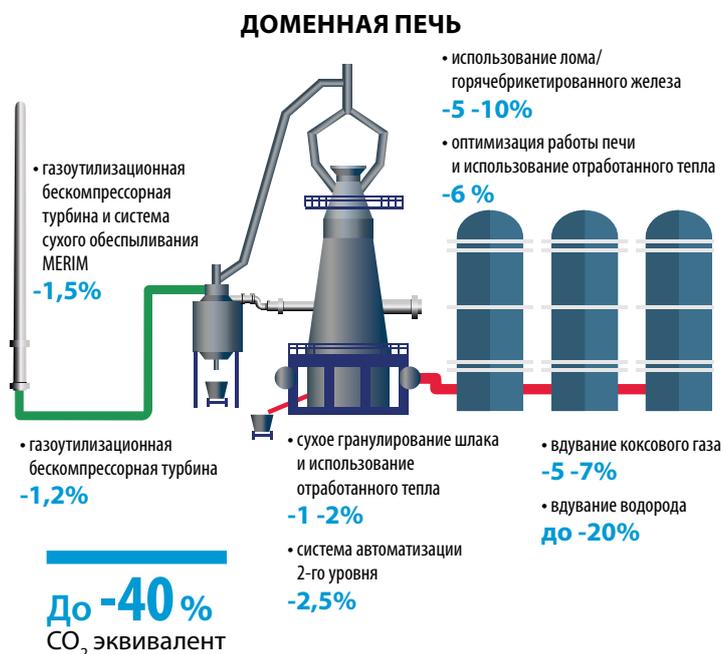
а) снижения использования природного сырья (ЖРС, коксующегося угля, кокса, флюсов);

б) повторного использования металлургических газов (доменный, коксовый газ и т. п.).

РЕМ в электросталеплавильном производстве позволяет оптимизировать энергозатраты. По

данным SMS group, в электродуговых печах 10% электроэнергии идет на избыточный нагрев, который не нужен для плавления лома. Поэтому переход на плавление лома с использованием природного газа позволяет сократить потребление первичной энергии на 32% и тем самым снизить выбросы CO₂ на 35% (с 330 до 215 кг/т стали).

Существующие возможности для снижения выбросов CO₂ в металлургическом производстве



Источник данных: Primetals



Технологии, позволяющие достичь углеродной нейтральности

УЛАВЛИВАНИЕ И ЗАХОРОНЕНИЕ/УТИЛИЗАЦИЯ CO₂

Улавливание и захоронение углекислого газа (Carbon capture and storage, CCS) предполагает отделение CO₂ от источников выбросов и последующую постоянную изоляцию от атмосферы (обычно в подземных хранилищах).

Улавливание и утилизация углекислого газа (Carbon capture and use, CCU) – похожий процесс, который отличается от CCS тем, что CO₂ не просто удерживается в специальных хранилищах, а используется в других производственных процессах (например, в производстве метана или полимеров). В этом заключается преимущество технологий CCU – CO₂ генерирует доход от продажи, повышая экономическую целесообразность его улавливания.

В качестве хранилищ углекислого газа могут использоваться отработанные нефтегазовые и угольные месторождения, а также глубокие соленосные

формации (осадочные породы, поры которых заполнены водой с высоким содержанием солей). В настоящее время большая часть уловленного CO₂ закачивается в действующие нефтяные месторождения для повышения дебита скважин.

Недостаток ряда концепций по использованию CO₂ заключается в том, что уловленный и переработанный CO₂ позже попадает в атмосферу при использовании продуктов (например, при сжигании топлива). Поэтому принципиальной целью улавливания и использования CO₂ должно стать производство таких продуктов, при использовании которых не выделяется CO₂. Как вариант, налаживание замкнутого цикла: из CO₂ производится продукция (например, пластик), которая в конце срока своего использования направляется на металлургический завод, где применяется в производстве (например, в качестве топлива) и при этом CO₂ улавливается. ►►

Направления утилизации CO₂



Источник данных: US Department of Energy's National Energy Technology Laboratory, Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan

По оценкам University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, **стоимость улавливания и хранения CO₂ может колебаться в диапазоне от \$25/т CO₂ до \$190/т CO₂** (сумма включает затраты на улавливание CO₂ из дымовых газов, транспортировку к месту хранения и хранение). Расходы на улавливание зависят от состава дымовых газов: чем ниже содержание CO₂ в выбросах, тем выше стоимость его улавливания. Процесс улавливания требует нагрева до температуры 120°C, которое может быть достигнуто за счет использования электричества или передачи остаточного тепла от производственных процессов.

Согласно данным Global CCS Institute, **затраты на транспортировку и хранение уловленного CO₂ варьируют от \$7/т CO₂ до \$35/т CO₂** в зависимости от расстояния между местом улавливания и местом хранения, типа хранилища и его доступности. Сжа-

тие CO₂ для транспортировки и хранения требует использования электричества.

В настоящее время **применение технологий CCS/CCU в металлургии осложнено наличием нескольких источников выбросов, из-за чего трудно улавливать более 60% CO₂**. Возможным решением проблемы является переход на технологию восстановительной плавки (smelting reduction), которая позволяет сконцентрировать выбросы в одном источнике. Альтернативный вариант – расширение использования доменных газов в металлургическом производстве и улавливание оставшихся выбросов CO₂.

Кроме того, **ограничивающими факторами являются дефицит локаций, подходящих для хранения уловленного CO₂**, а также рост операционных расходов, связанный с поддержанием оборудования для CCS/CCU.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГАЗА ИЛИ ВОДОРОДА ВМЕСТО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗА ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Прямое восстановление железа – производственный процесс, который позволяет получить альтернативное сырье для электродуговых печей: металлизированные окатыши (DRI – Direct Reduced Iron) и горячбрикетированное железо (HBI – Hot Briquetted Iron). Для этого используется богатое железорудное сырье (с содержанием железа не менее 67%), которое восстанавливается при высоких температурах до содержания железа 90% и более. В качестве восстановителя выступает природный газ (до 400 м³ на тонну DRI).

Прямое восстановление железа с последующей выплавкой стали в электродуговых печах выбирается на 50% меньше CO₂ по сравнению с цепочкой «доменная печь – конвертер». Однако в ЕС, как и в Украине, прямое восстановление железа не распространено из-за отсутствия дешевого газа. Производство продуктов DRI

и HBI сконцентрировано в основном на Ближнем Востоке, в Северной Африке и Латинской Америке.

Основная идея по сокращению выбросов заключается в замене природного газа биогазом или водородом. Возможность использования водорода для восстановления железа не вызывает вопросов – в обычном DRI-процессе, который базируется на природном газе, водород восстанавливает до 50% железа, остальная часть восстанавливается углеродом.

Переход на водород с целью декарбонизации порождает ряд вызовов. Прежде всего, водород должен производиться без выбросов CO₂. Это может достигаться либо с помощью улавливания углекислого газа, либо с использованием альтернативных источников электроэнергии. **Если водород будет производиться из воды путем электролиза, потребуется 3-4 МВт·ч «зеленой» электроэнергии**

на тонну стали. Если водород будет производиться из природного газа с помощью доминирующей сегодня паровой конверсии метана, необходимо будет улавливать 0,5 т CO₂ в расчете на каждую тонну произведенной стали.

Отдельный аспект – это необходимость создания больших хранилищ для водорода. По мнению University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, металлургическим заводам придется содержать как минимум пятидневный запас водорода, который позволит обеспечить непрерывность производственных процессов.

Для достижения углеродной нейтральности при производстве стали из DRI необходимы изменения по всей производственной цепочке. Например, необходимо добиться безуглеродного производства окатышей/концентрата, что требует развития технологий горнодобывающих компаний.

Технологии прямого восстановления железа с использованием водорода

Технология	Сущность	Преимущества	Недостатки
Производство железа прямого восстановления в шахтной печи	Окатыши при температуре 800 °С с помощью водорода превращаются в железо прямого восстановления	<ul style="list-style-type: none"> - возможность использовать небольшие установки; - легкая управляемость производственным процессом; - возможность установки оборудования на действующих мощностях с дальнейшим использованием железа прямого восстановления в кислородно-конвертерном и электродуговом производстве стали 	<ul style="list-style-type: none"> - базируется на использовании железорудных окатышей, при производстве которых выбрасывается CO₂ (уровень выбросов зависит от используемого топлива); - требует поставок 100% «зеленой» электроэнергии - нуждается в поставках «зеленого» водорода, для производства которого еще не разработаны масштабные установки электролиза
Производство железа прямого восстановления в реакторах с псевдоожиженным слоем	Похоже на производство в шахтной печи, только в качестве сырья используется железорудный концентрат	<ul style="list-style-type: none"> - снижение выбросов CO₂ и расходов, связанных с окомкованием; - более высокий уровень содержания железа в конечном продукте (95% по сравнению с 90% при производстве в шахтной печи) 	<ul style="list-style-type: none"> - зависит от поставок «зеленого» водорода и «зеленой» электроэнергии; - технология менее развита по сравнению с производством в шахтных печах и требует больше инвестиций
Производство стали на основе суспензии	Железная руда проходит этап ультратонкого измельчения в процессе производства концентрата. Затем концентрат за несколько секунд восстанавливается с использованием водорода в высокотемпературном флеш-реакторе. В реактор добавляют углерод и на выходе получают жидкую сталь	<ul style="list-style-type: none"> - железная руда превращается в сталь в одном реакторе, поэтому из производственного процесса исключается производство кокса, чугуна, агломерирование/окомкование железной руды и т.д.; - низкое содержание примесей в производимой стали 	<ul style="list-style-type: none"> - технология находится на экспериментальной стадии; - внедрение технологии требует значительных инвестиций; - ультратонкий помол железной руды требует высоких энергозатрат
Производство стали с использованием водородной плазмы	Железная руда (в небогатом виде либо в виде концентрата/окатышей) восстанавливается в плазменном реакторе водородной плазмой. Водородная плазма – водородный газ, который в результате нагрева или электрического воздействия разделится на ионы	<ul style="list-style-type: none"> - возможность использовать железную руду без ее предварительной обработки; - низкие температуры в реакторе в ходе производственного процесса; - поддается комбинированию с другими технологиями (например, восстановительной плавкой) 	<ul style="list-style-type: none"> - технология на очень ранней стадии развития, полноценный реактор еще не разработан

Источник данных: Roland Berger



ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ПЛАВКА (SMELTING REDUCTION)

Технологии восстановительной плавки позволяют исключить из производственного процесса коксохимический завод, аглофабрику и доменную печь. Существуют несколько разновидностей восстановительной плавки, но **в общем виде производственный процесс включает две стадии:**

- **на первой стадии** железная руда (например, кусковая руда или окатыши) загружается в восстановительный реактор, где при помощи газа восстанавливается до состояния, подобного DRI. При этом газ поступает из второго агрегата (плавильной печи-газификатора), в котором происходит газификация угля;
- **на второй стадии** полученный продукт передается

в плавильную печь-газификатор, в которой происходят окончательное восстановление и плавка путем взаимодействия с газифицированным углем. На выходе получается чугун, который может быть переработан в сталь в кислородном конвертере.

Преимущества восстановительной плавки:

- **снижение расходов энергии на 20%;**
- замена кокса углем, который не должен быть обязательно коксующимся;
- за счет объединения нескольких производственных процессов в один формируется один источник выбросов CO₂. Поэтому **может улавливаться до 90% выбросов углекислого газа.**

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗА (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ)

Метод находится на стадии лабораторных испытаний. Существуют две его разновидности.

Электролиз

Железная руда растворяется в электролите (расплавленном оксиде или смеси оксидов, например, оксида кальция, оксида алюминия и оксида магния) при температуре около 1600 °С. Затем через раствор пропускают электрический ток. В результате восстановленное железо оседает на катоде, а кислород – на аноде. Итоговый продукт электролиза – жидкая сталь;

Электровыделение

Железная руда измельчается до ультратонкого концентрата, выщелачивается и затем восстанавливается в электролизере при температуре около 110°С. Итоговый продукт электровыделения – железные пластины, которые используются как сырье для электродуговой печи.

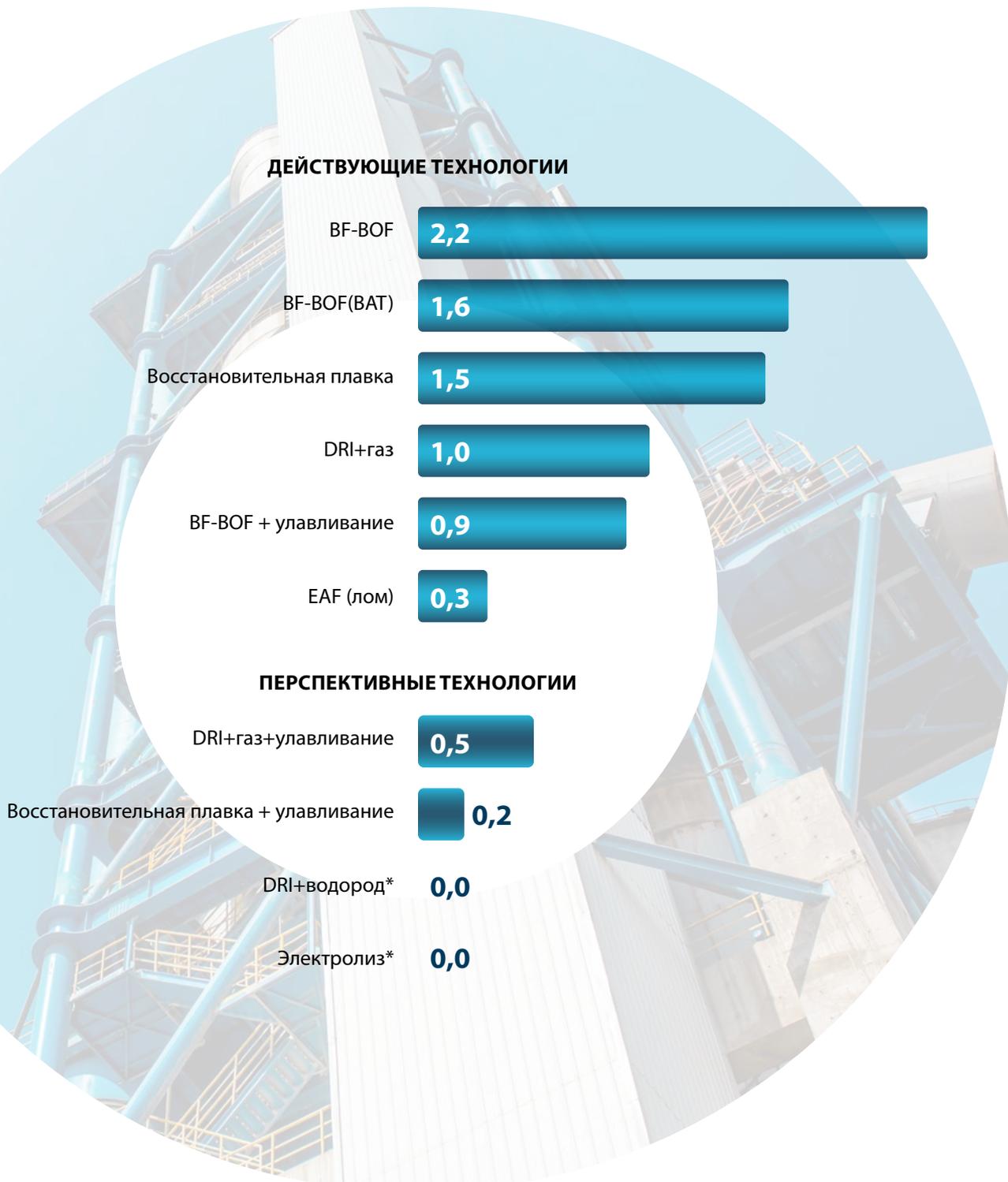
Для обеих разновидностей метода состав электролита, температура, материал анода являются предметом дальнейших исследований.

В перспективе электролитический процесс может стать самым энергоэффективным методом производства стали, поскольку он не включает ряд стадий производства, характерных для других технологий (производство кокса, окатышей, агломерата, водорода и т.п.). По оценкам IEA, **производство на основе электролиза потребует на 15-30% меньше электроэнергии в расчете на тонну стали** по сравнению с производством из DRI на основе водорода. Также **потенциально внедрение электролитического процесса требует меньших капитальных инвестиций, поскольку не требуется большого количества оборудования.**

В то же время электролитическая технология находится еще на ранней стадии исследований. По сравнению с прямым восстановлением железа водородом электролитический процесс является менее гибким и не поддается быстрой приостановке.

Кроме того, электролитический процесс нуждается в постоянном источнике электроэнергии (с точки зрения декарбонизации электроэнергия должна быть из возобновляемых источников). Основная проблема – высокая цена «зеленой» электроэнергии, недостаточные ее объемы, непостоянство «зеленой» энергогенерации на фоне отсутствия возможностей хранения электроэнергии.

Сравнение различных технологий по уровню выбросов CO₂, удельные прямые и не прямые выбросы CO₂, т/т стали



* при условии использования электроэнергии из возобновляемых источников энергии и водорода, полученного без выбросов CO₂

Источники данных: IEA, University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, оценки GMK Center

Ряд сложностей ограничивает возможности декарбонизации

Достижение целей карбонной нейтральности для металлургического производства в мире возможно только в долгосрочной перспективе. Процесс декарбонизации в стальной отрасли осложнен по причинам, которые можно разделить на две группы – технологические и экономические.

Технологические

1 | Большое количество источников выбросов

На интегрированном металлургическом предприятии может быть более 1000 источников выбросов, в том числе неорганизованных. Мероприятия по повышению эффективности и снижению выбросов необходимо провести на каждом из них. Источником выбросов является в том числе и используемое сырье (ЖРС, кокс), которое невозможно заменить, применяя действующие технологии.

2 | Необходимы новые технологии

Согласно оценкам McKinsey, 45% выбросов CO₂ на металлургическом заводе связано с высокотемпературным нагревом, который невозможно обеспечить без ископаемых источников топлива. Альтернативные технологии находятся только на этапе разработки. Риски для отрасли создает тот факт, что цели по снижению выбросов на государственном уровне уже поставлены, в то время как сроки появления новых технологий не определены.

3 | Кардинальное изменение производственных цепочек

Разные этапы производства стали глубоко интегрированы друг с другом. Изменение на одном из них ведет к изменению в других. Технологии с использованием водорода могут столкнуться с нехваткой сырья, так как на данный момент нет решений по производству водорода в необходимых масштабах, а также систем хранения и доставки.

4 | Доступность энергоресурсов

Альтернативные технологии производства стали потребуют увеличения потребления электроэнергии на порядок. При этом речь идет об экологически чистой электроэнергии. Также будут нужны инвестиции в расширение системы поставки электроэнергии.

Экономические

1 | Высокая потребность в инвестициях

Смена технологий на интегрированных заводах будет подразумевать полную перестройку действующих производств. По сумме инвестиций такая смена технологий сопоставима со строительством новых заводов. В отношении сумм необходимых инвестиций есть значительная неопределенность, так как новые технологии еще не выведены на этап промышленного применения.

2 | Более высокая себестоимость производства

Низкоуглеродные технологии повысят себестоимость, например расходы на электроэнергию и водород. То есть внедрение технологий декарбонизации будет означать потерю конкурентоспособности. В этом контексте государства стремятся выравнять конкурентоспособность путем реализации соответствующей политики. Данные политики могут являться скрытым инструментом протекционизма.

3 | Негативные социальные последствия

Стальная отрасль является базовой даже для развитых стран и имеет высокую социальную значимость. Отказ от использования угля, кокса, использование электропечей вместо цепочки «доменная печь – конвертер», приведет к значительному сокращению потребности в рабочей силе. Сокращение персонала будет связано с рисками в социальной сфере регионов.

4 | Зависимость от государства

От государства будут зависеть вопросы его участия в финансировании проектов декарбонизации и применения новых технологий, выравнивания условий конкуренции, нейтрализации социальных рисков. Асинхронность в государственной политике разных стран будет создавать риски для конкурентоспособности компаний, в частности из развивающихся стран. ■

Декарбонизация требует значительных инвестиций

Поскольку достижение карбонной нейтральности возможно только путем коренного изменения технологий производства и цепочек поставок, это потребует от отрасли значительных инвестиций, сравнимых со строительством новых мощностей. Сумма инвестиций в проекты декарбонизации в горизонте до 2050 г. оценивается в среднем в \$1000 на тонну стали, в диапазоне от \$600 до \$1850.

Оценки сумм капитальных инвестиций в проекты декарбонизации

Источник	Объект	Сумма CAPEX, \$млрд	На тонну стали*, \$
Оценки международных консалтинговых компаний и ассоциаций			
McKinsey	Инвестиции в глобальную отрасль до 2050 г., базовый сценарий	3000	1850*
IEA	Инвестиции в глобальную отрасль до 2050 г., Sustainable Development Scenario	1400	866*
McKinsey	Инвестиции в отрасль в ЕС до 2050 г.	120	1000*
Roland Berger	Инвестиции в отрасль в ЕС до 2050 г.	120	1000
Данные корпоративных проектов			
Voestalpine	DRI+H2 мощностью 7,5 млн т в год	8,4	1120
	Инфраструктура	27,6	3680
ArcelorMittal Europe	Установки улавливания	18-30	1 000-1500
	DRI+H2	36-48	
	Инфраструктура	до 240	до 4600
H2 Green Steel	DRI+H2 в Швеции мощностью 5 млн т	3,0	600

* в расчете на тонну номинальной мощности по производству конвертерной стали

Источники данных: данные компаний, данные СМИ, расчеты GMK Center

Значительно больших сумм инвестиций потребует подготовка цепочек поставок: производство «зеленого» водорода в промышленных масштабах и «зеленой» электроэнергии. Исходя из данных заявленных проектов, порядок сумм составляет \$3700-4600 на тонну стали.

Сложности, связанные с инвестициями:

1. Имеющаяся долговая нагрузка в отрасли высока и затрудняет привлечение столь значительных сумм финансирования. По итогам 2019 г. средний показатель Net Debt/EBITDA в отрасли составлял максимально допустимые 3,0.
2. Ожидаемый слабый рост спроса обуславливает низкую маржинальность – \$90 EBITDA на тонну стали в среднем, что при сумме инвестиций

в \$1000 на тонну мощности обуславливает длительный период окупаемости.

3. Избыточные мощности в отрасли также являются проблемой, которая повышает конкуренцию, вызывает волатильность на рынках, оказывает давление на финансовые результаты компаний, повышает риски инвестиций.
4. Применение новых технологий в случае декарбонизации продиктовано административным давлением, целями по снижению выбросов, установленными государством, а не экономическими факторами. Поэтому часть финансирования должно принимать на себя государство. Экологические политики в большинстве стран не готовы к внедрению необходимых инструментов финансирования декарбонизации. ■

Декарбонизация ведет к росту себестоимости производства

Технологии производства стали с низкими выбросами не получили распространения ранее, так как сопряжены с более высокими производственными расходами. По сравнению с производством стали по традиционному пути доменная печь – конвертер (BF-BOF) производство тонны стали по низкоуглеродным технологиям обойдется на 10-80% дороже.

Рост себестоимости производства стали с помощью новых технологий по сравнению с традиционным путем BF-BOF

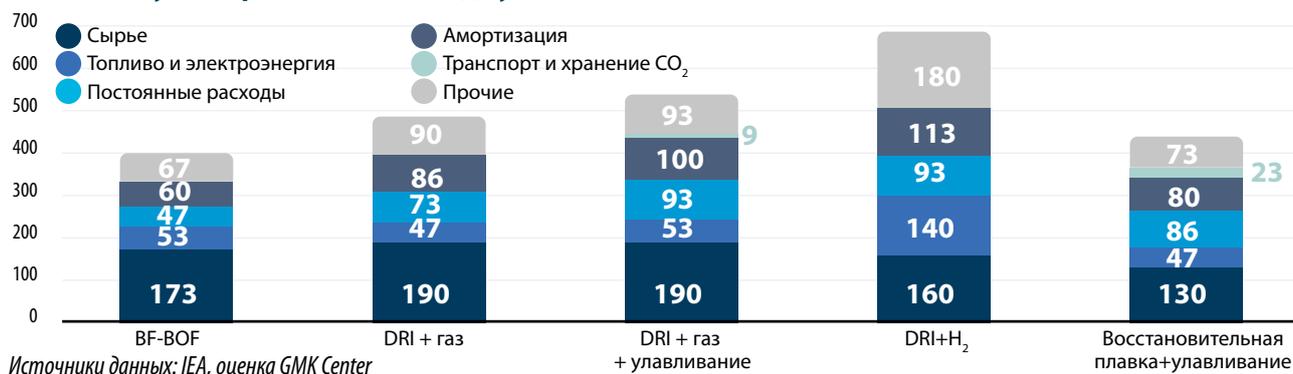
Технология	Источник расчетов	Рост, %
DRI с использованием газа	IEA	+22%
	Voestalpine	+30%
DRI с использованием газа и улавливанием	IEA	+35%
DRI с использованием водорода	University of Cambridge Institute for Sustainability	+10-27%*
	IEA	+72%
	ArcelorMittal	+60%
	Voestalpine	+80%
Восстановительная плавка с улавливанием	University of Cambridge Institute for Sustainability	+15%
	IEA	+10%

* в зависимости от цен на электроэнергию



Производство стали по технологии DRI на 20-30% дороже, чем традиционный путь BF-BOF. Однако данная технология обеспечивает снижение удельных выбросов CO₂ лишь до 1,0 т. Согласно исследованию IEA, **оснащение печей для производства DRI установками улавливания прибавит к себестоимости еще 11%**. Безуглеродное производство при помощи DRI может быть достигнуто альтернативным способом – **использованием водорода в качестве восстановителя**. Производство стали по данной технологии будет еще на 27% более затратно, чем применение технологии улавливания. Однако использование водорода будет оправдано в регионах с дешевой электроэнергией и там, где отсутствуют возможности хранения CO₂, а его транспортировка связана с высокими расходами.

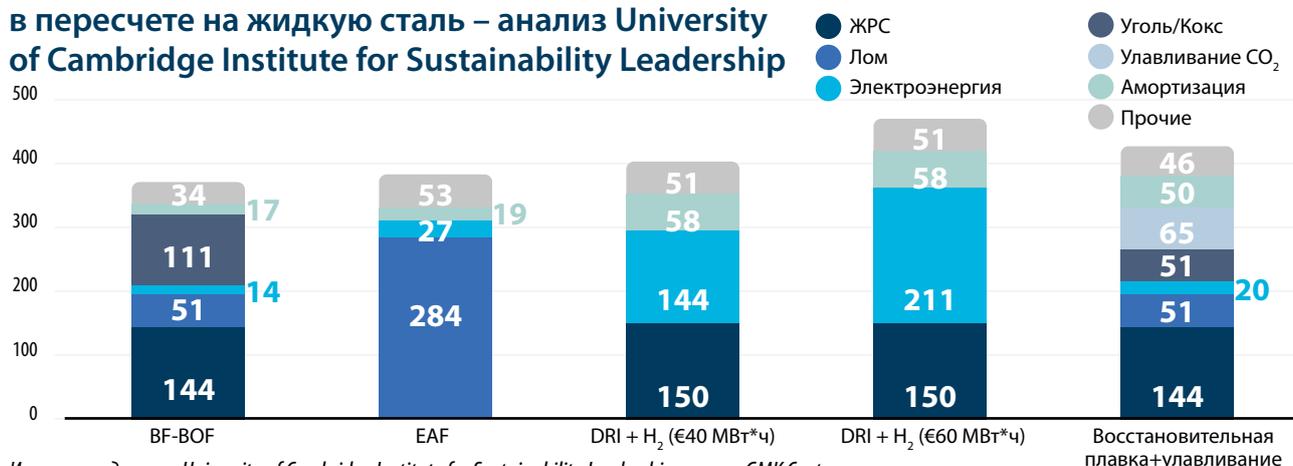
Себестоимость производства стали по различным технологиям, \$ на тонну в пересчете на жидкую сталь – анализ IEA



Источники данных: IEA, оценка GMK Center

Анализ, проведенный University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, показывает, как изменится структура производства стали при переходе к безуглеродным технологиям. Если по традиционным технологиям основную долю в себестоимости занимало сырье, то в технологиях с производством DRI на первое место выходит электроэнергия. Расходы на электроэнергию будут занимать 35-45% в общей себестоимости производства стали из DRI. Электроэнергия будет наиболее чувствительным фактором себестоимости. Например, рост цен с €40 до €60 за МВт·ч приведет к росту себестоимости стали на 17%. Главным фактором конкурентоспособности станет доступ не к сырью, а к источникам дешевой электроэнергии. В результате повысится волатильность на рынке, поскольку такие факторы, как изменения погоды, могут влиять на цены. Также такая ситуация изменит расстановку сил и степень влияния поставщиков сырья на производителей стали, что отразится на ситуации на рынках сырья.

Себестоимость производства стали по различным технологиям, \$ на тонну в пересчете на жидкую сталь – анализ University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership

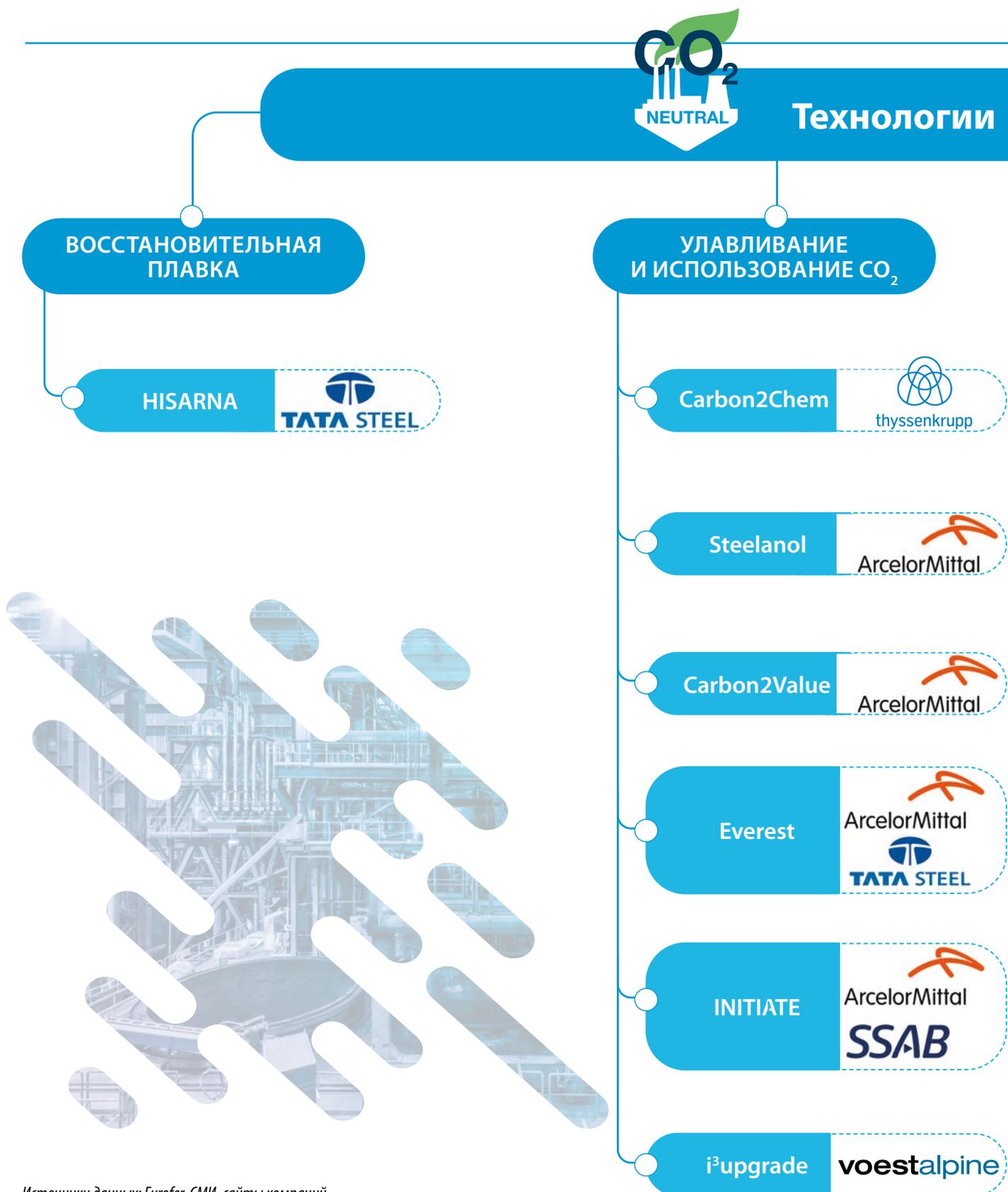


Источники данных: University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, оценка GMK Center

Отличия в суммах расходов в различных исследованиях обусловлены различными допущениями к ценам на сырье, в особенности на электроэнергию и водород, что является предметом наибольшей неопределенности. Понимая риски, связанные с колебаниями цен и возможным дефицитом поставок водорода, большинство компаний, активных в направлении R&D, объявили о реализации собственных проектов или партнерств, направленных на генерацию электроэнергии из возобновляемых источников и производство водорода.

Стоит отметить важный момент: оба исследования показали, что **наиболее эффективной технологией производства стали с нулевыми выбросами, с точки зрения расходов, будет технология восстановительной плавки с использованием установок улавливания CO₂**. Использование данной технологии может быть связано с увеличением расходов на 10-15% по сравнению с традиционной технологией BF-BOF. Восстановительная плавка сходна по структуре расходов с традиционной технологией. Она предполагает более низкие расходы на сырье, а именно на кокс, так как в процессе производства используется газифицированный уголь. При этом удорожание технологии обусловлено расходами на улавливание CO₂ (на \$23-65, по разным оценкам). Если не учитывать разницу в сумме амортизационных отчислений, то восстановительная плавка будет обходиться только на 6% дороже традиционной технологии. ■

Компании отрасли активно



Источники данных: Eurofer, СМИ, сайты компаний

инвестируют в R&D

углеродной нейтральности

DRI НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА

HYBRIT



SuSteel

voestalpine

H₂ Hamburg



SALCOS



GISH

HYFOR

voestalpine

ЭЛЕКТРОЛИЗ

Siderwin



Boston Metal



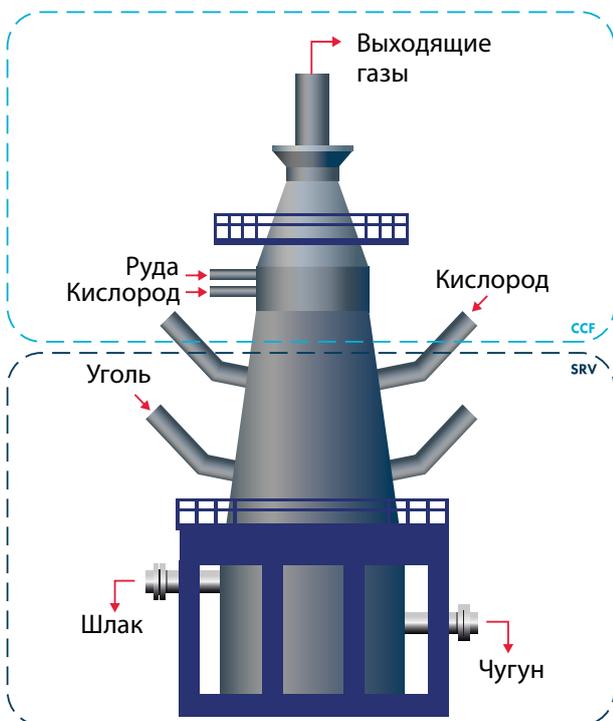
Представленный список – это перечень проектов, которые реализуются в настоящее время. В этот список не вошли научно-исследовательские проекты, реализация которых уже завершена. Это STEPWISE (улавливание CO₂ из доменных газов и производство из них водорода), FreSMe (производство метанола из смеси CO₂, полученного из доменного газа, и H₂, полученного либо из доменного газа, либо с помощью электролиза), Carbon4Pur (получение из металлургических газов полиолов – основных компонентов полиуретановых изоляционных материалов и покрытий), BOF2Urea (улавливание CO₂ и использование его в производстве карбамида).

Восстановительная плавка

HISARNA

HISARNA – проект Tata Steel, который основан на технологии восстановительной плавки. Разрабатывается совместно с горнодобывающей компанией Rio Tinto. В настоящее время Tata Steel, Rio Tinto, ArcelorMittal, ThyssenKrupp, Voestalpine и Paul Wurth занимаются тестированием и дальнейшим развитием технологии.

Схема процесса HISARNA



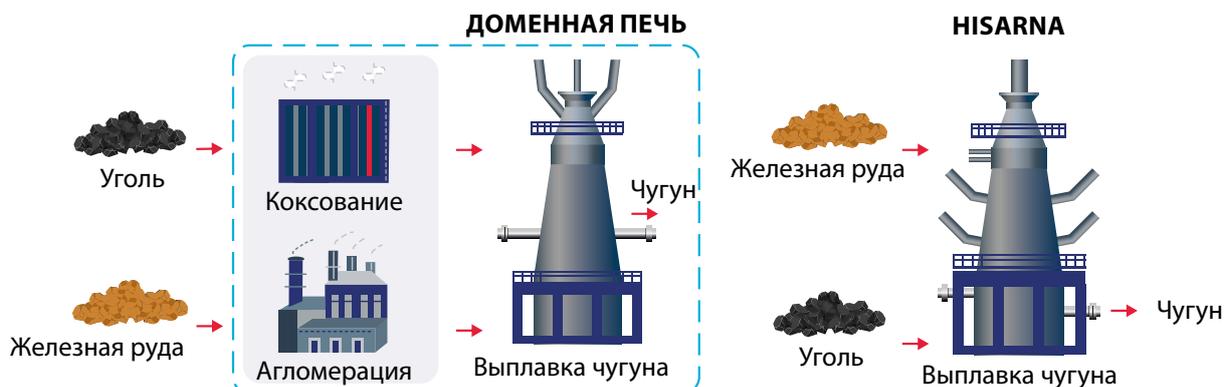
HISARNA в одном агрегате объединяет компоненты двух технологий – циклонного печного конвертера (Cyclone Converter Furnace, CCF) и аппарата жидкофазного восстановления (HIsmelt™ Smelt Reduction Vessel, SRV). CCF – разработка Tata Steel, SRV – изначально разработан Rio Tinto, позже приобретен Tata Steel.

Производственный процесс происходит следующим образом:

- измельченная руда и кислород вдуваются в циклон, производя в итоге частично восстановленное железо, которое стекает вниз (в SRV);
- расплавленная руда из циклона растворяется в шлаке;
- смешивание металла со шлаком сопровождается подачей пылеугольного топлива;
- углерод, растворенный в металле, восстанавливает железо из шлака, на выходе получается чугун и CO;
- CO с угольными частицами поднимается вверх, где частично сжигается кислородом, генерируя тепло;
- часть тепла возвращается в ванну с металлом;
- остаток тепла используется для плавления руды и восстановления железа в CCF.

В результате производственный процесс упрощается по сравнению с доменной печью.

Сравнение процесса HISARNA и доменного процесса



Снижение выбросов в технологии HISARNA по сравнению с доменной печью

Сценарии	Снижение выбросов		
	CO ₂	NO _x	SO _x
HISARNA без улавливания и захоронения углерода	20%	70%	60%
HISARNA с улавливанием и захоронением углерода	80%	90%	85%

Источник данных: Tata Steel

Установка HISARNA выбрасывает практически чистый углекислый газ, который легко улавливать. Кроме того, HISARNA позволяет снизить выбросы CO₂:

- на 20% – без изменения базовой технологии;
- на 50% – с использованием производстве биомассы и металлолома;
- на 80% – с использованием технологий CCS.

Благодаря исключению из производственного процесса коксохимического завода и аглофабрики HISARNA также позволяет снизить выбросы других газов.

Пилотный завод HISARNA был построен в 2010 г. на заводе Tata Steel в Эймёйдене (Нидерланды) в рамках проекта ULCOS (Ultra-Low CO₂ steelmaking). Мощность завода – 65 тыс. т чугуна в год. Инвестиции в строительство – €20 млн.

С 2011 г. на пилотном заводе проводят эксперименты с использованием различного сырья (энергетического угля, низкокачественной железной руды, металлолома, древесного угля). Проект HISARNA получал финансирование от партнеров, программ ЕС (EU FP6, Research Fund for Coal and Steel, Horizon 2020), правительства Нидерландов (Demonstratie Energie Innovatie).

В 2010-2017 гг. общие инвестиции в проект составили свыше €60 млн. Последняя существенная модернизация проводилась в 2015-2017 гг. (инвестиции – €25 млн).

Строительство демонстрационного завода промышленного масштаба (0,5-1,0 млн т в год) потребует инвестиций в размере €300-350 млн (без учета установки по улавливанию CO₂). Стоимость установки по улавливанию углекислого газа – как минимум €20-25 млн.

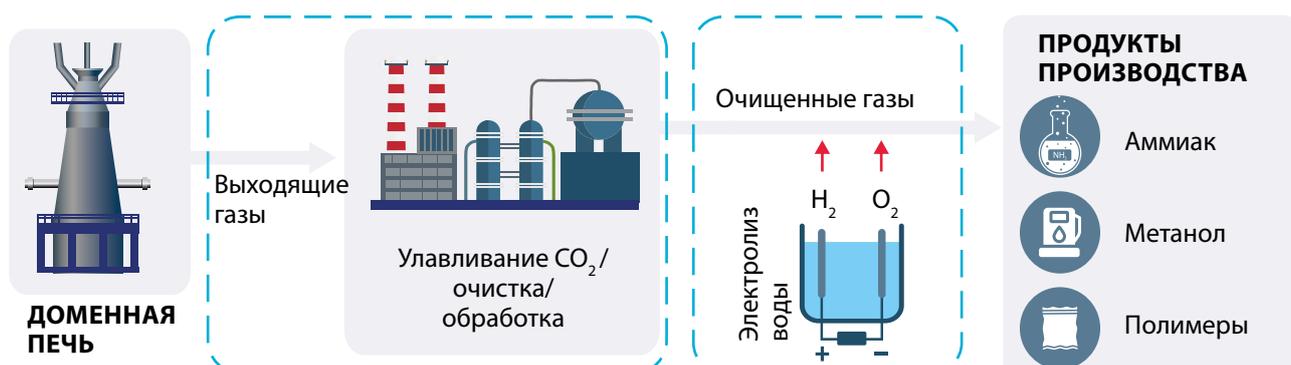
Если технологию получится разработать для применения в промышленном масштабе, **переход на стадию коммерческого использования займет 10 лет.** В дальнейшем технологию можно будет использовать при строительстве новых заводов.

Улавливание и использование CO₂ Carbon2Chem

Carbon2Chem – совместный проект ThyssenKrupp и 17 других партнеров. Предлагает следующую схему производства:

1. Дымовые газы металлургического завода (коксовый, доменный, конвертерный) очищают от ненужных примесей;
2. К очищенным газам добавляют водород и кислород, полученные путем электролиза воды с использованием альтернативных источников электроэнергии;
3. Из газовой смеси производят химические продукты – аммиак, метанол, полимеры или высшие спирты ▶▶

Схема процесса Carbon2Chem



На проведение исследовательских работ израсходовано €120 млн. Для демонстрационной фазы необходимо €500 млн. Для масштабирования технологии до промышленных размеров потребуется до €1 млрд инвестиций.

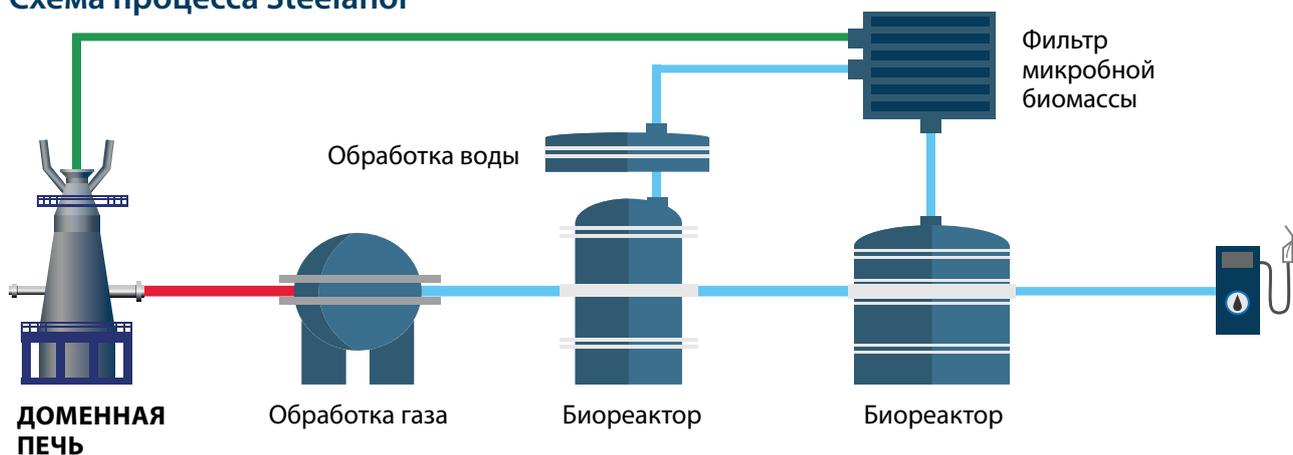
С 20.09.2018 г. работает пилотный завод, на котором производится метанол. На строительство завода €60 млн выделило Федеральное Министерство образования и исследований Германии, а ThyssenKrupp инвестировал €34 млн. На вторую фазу работ ThyssenKrupp получил €75 млн от Министерства образования до 2024 г.

Ожидается, что проект будет готов к промышленному внедрению к 2030 г. В рамках металлургии Германии Carbon2Chem способен сократить выбросы CO₂ на 20 млн т в год.

Steelanol

Steelanol – проект ArcelorMittal, позволяющий получать биоэтанол из металлургических газов. В основе проекта – ферментация дымовых газов с помощью специальных бактерий. На каждую тонну произведенной стали рассчитывают получать 50 кг биоэтанола.

Схема процесса Steelanol



Пилотная установка по производству биоэтанола будет построена на бельгийском заводе ArcelorMittal (**инвестиции в строительство – €120 млн**). ЕС выделил на реализацию проекта €10 млн.

Старт производства биоэтанола запланирован на 2020 г. Установка будет улавливать 15% дымовых газов завода и конвертировать их в 80 млн литров этанола в год.

Если все металлургические заводы ЕС (28 участников) с конвертерным производством будут полностью перерабатывать дымовые газы, используя технологию Steelanol, выбросы CO₂ сократятся на 33,3 млн т в год.

Carbon2Value

Carbon2Value – совместный проект ArcelorMittal и пяти партнеров (исследовательских организаций и поставщиков технологий). Предполагает улавливание углеродсодержащих газов с последующим разделением на CO и CO₂. CO будет использоваться для производства этанола как компонента транспортного топлива (Steelanol – дочерний проект Carbon2Value) и синтетических углеводородов. CO₂ планируется использовать в будущем.

Цель проекта – доказать **возможность снижения выбросов CO₂ в металлургии на 30-45%** за счет

предложенной технологии улавливания и переработки.

Пилотный завод Carbon2Value запущен 18.03.2019 г. на базе ArcelorMittal Gent. Установка, введенная в эксплуатацию, отделяет CO₂ и CO от металлургических газов. Бюджет проекта составил €10,5 млн, из которых €4,4 млн выделено в рамках программы ЕС «Interreg 2 Seas».

В процессе строительства находится другой пилотный проект по улавливанию CO₂ – на заводе ArcelorMittal Dunkirk. **Затраты на реализацию – €20 млн.**

Everest

Everest (Enhancing Value by Emissions Re-use & Emissions Storage) – проект Tata Steel, в котором также участвуют Dow Chemical, Arcelor Mittal, ISPT, University of Gent, ECN. Цель проекта – снизить выбросы CO₂ на Tata Steel на 4 млн т в год.

В основе проекта лежит идея превращения углеродсодержащих газов в лигроин (нафту) – жидкое топливо. В числе других возможных результатов переработки – метанол, уксусная кислота, керосин, аммиак, метан.

Схема процесса Everest



Производственная цепочка включает следующие этапы:

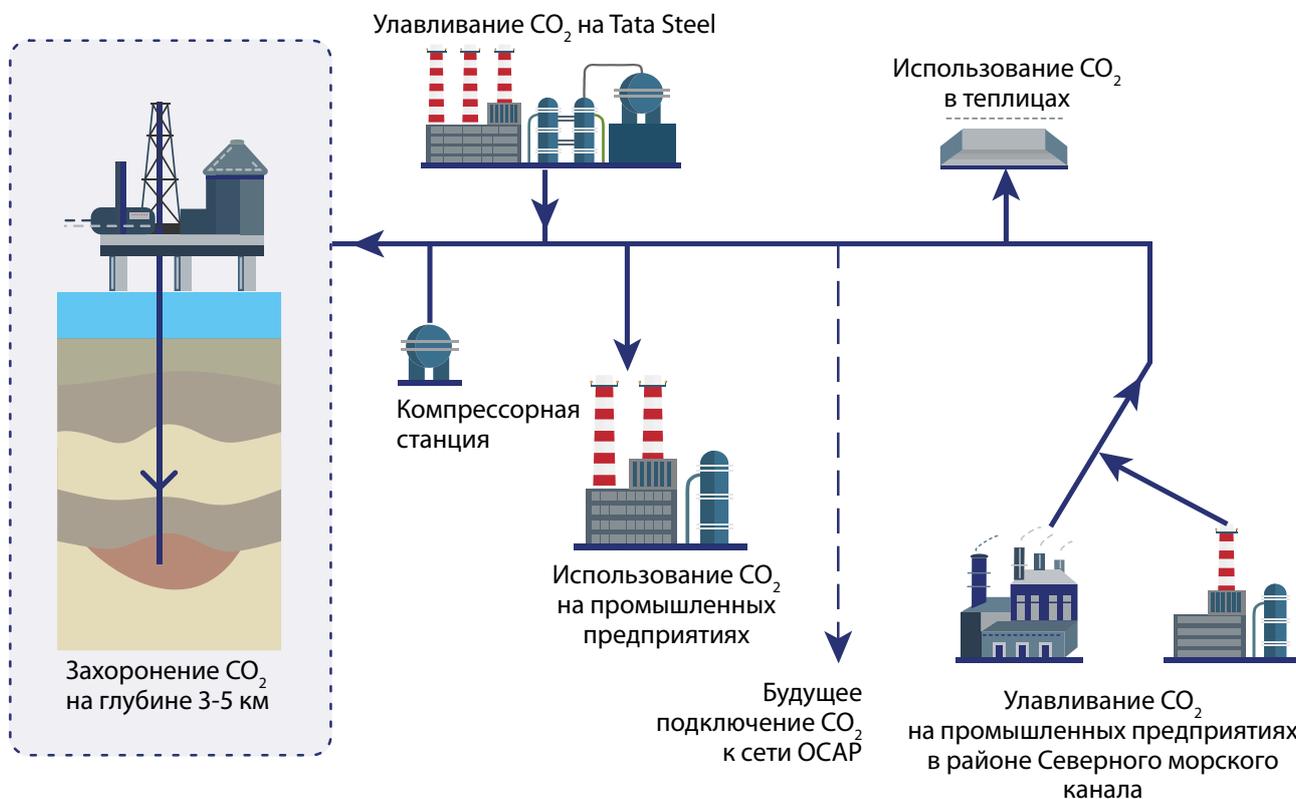
1. Доменный газ направляется на очистку от примесей азота и серы, после чего проводится водогазовая реакция (water-gas shift). Ее цель – достичь оптимального соотношения CO:H₂ (для лигроина – 2,1:1);
2. Улавливание CO₂;
3. Сжатие CO₂ до необходимого давления для передачи газа в систему проекта Athos (см. *Схему на стр. 30*);
4. Конверсия синтез-газа в химические продукты. Для производства лигроина используется процесс Фишера-Тропша;
5. Финальная обработка углеводородов (например, сушка) и отделение газообразной фазы от жидкой.

Работы по проектированию пилотного завода по улавливанию CO₂ начаты во 2-м квартале 2019 г. Во 2-м квартале 2020 г. ожидается запуск пилотной установки на заводе ArcelorMittal Gent (Бельгия), а в 4-м квартале 2021 г. – на заводе Tata Steel IJmuiden (Нидерланды). В 3-м квартале 2021 г. начнется инжиниринг завода для процесса Фишера-Тропша. **Выход проекта Everest на коммерческий масштаб ожидается во 2-м квартале 2027 г.**

С Everest связан проект Athos – сеть транспортировки и хранения CO₂ в области Канала Северного моря (канал от порта Амстердам до Северного моря в Эймейдене). Проект Athos реализует консорциум в составе Tata Steel, Port of Amsterdam, Gasunie, EBN. ▶▶

Сеть Athos.

Улавливание, транспортировка, использование и хранение CO₂ в Северном море



Сеть Athos будет включать наземные трубопроводы для CO₂, офшорные хранилища, а также точки входа и выхода для компаний, подключенных к сети. Проект находится на стадии выявления интереса к подключению к такой сети (до 31.12.2019 г. проводился сбор анкет от компаний – потенциальных участников сети).

INITIATE

INITIATE – исследовательский проект, который реализует консорциум участников под руководством TNO. Из числа представителей металлургии – ArcelorMittal Belgium и SSAB. Проект разрабатывает технологию производства карбамида из отходящих газов металлургических заводов. Участники намерены составить дорожную карту для коммерческого внедрения технологии после

завершения исследовательского проекта.

Ожидаемые результаты проекта: снижение первичной энергоемкости на 30%, выбросов CO₂ – на 95%, материалоемкости – на 40%, генерации отходов – на 90%.

Сроки реализации проекта – 01.11.2020–30.04.2025. **Бюджет – €23,1 млн**, из которых €21,3 млн – грант ЕС.

i³upgrade

i³upgrade (Integrated and intelligent upgrade of carbon sources through hydrogen addition for the steel industry) – совместный проект Университета Эрлангена – Нюрнберга и восьми других партнеров, в числе которых Voestalpine и Primetals. Разрабатывает технологию использования дымовых газов металлургических комбинатов с добавлением водорода для производства метана и метанола.

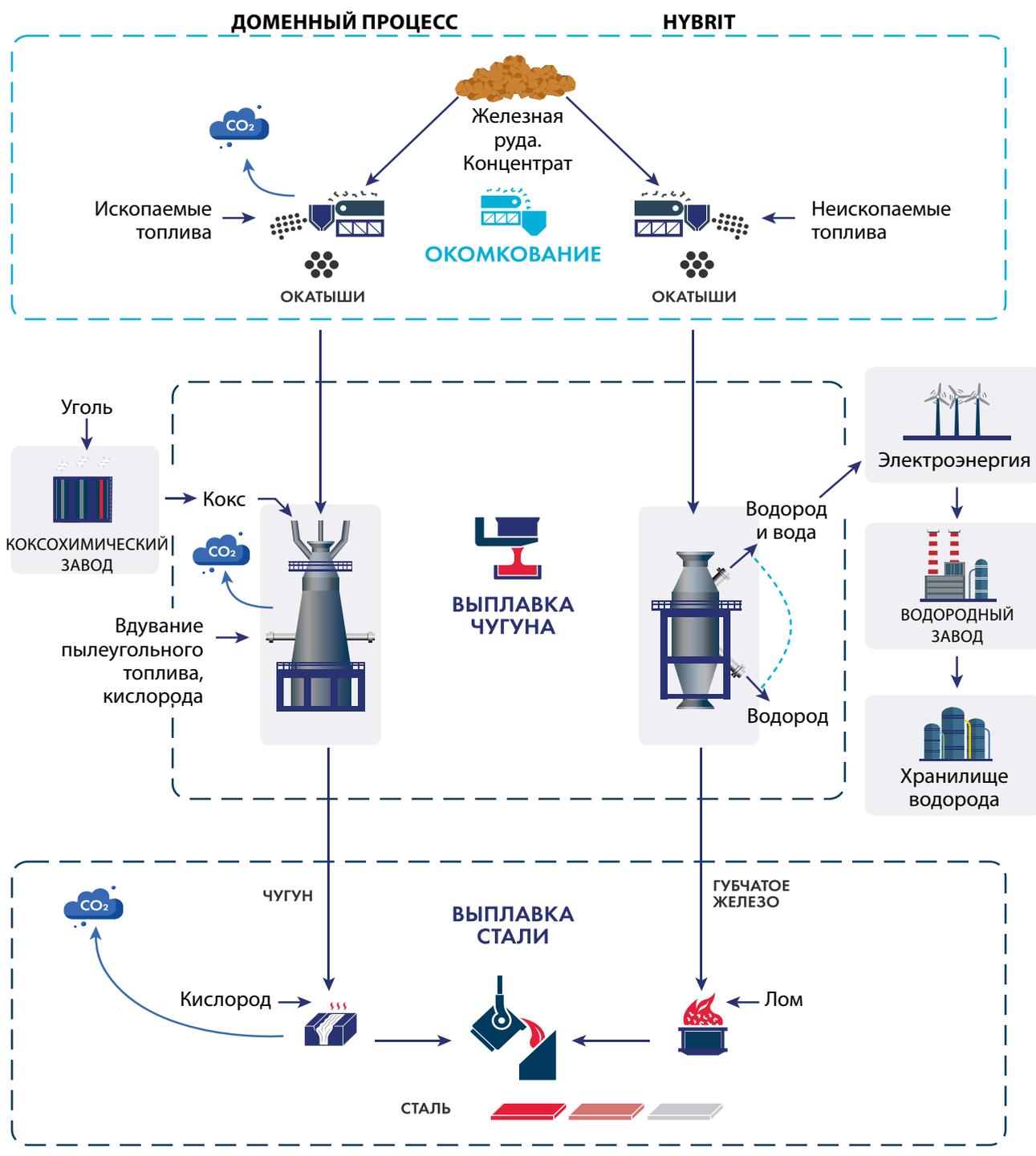
Период реализации проекта – июнь 2018 г. – ноябрь 2021 г. **Бюджет – €3,3 млн**. Получено финансирование от Research Fund for Coal and Steel (RFCS).

DRI на основе водорода

HYBRIT

HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) – совместный проект трех шведских компаний (SSAB, LKAB и Vattenfall). В основе проекта – прямое восстановление железа с использованием водорода. Водород планируется производить путем электролиза воды с помощью возобновляемой энергии. ►►

Сравнение процесса HYBRIT и доменного процесса



Предварительное технико-экономическое обоснование проекта выполнено в 2016-2017 гг. Оно показало, что **переход на прямое восстановление железа водородом позволит снизить выбросы CO₂ в расчете на тонну стали на 98,4%** – с 1600 кг (при производстве по цепочке «доменная печь – конвертер» в Швеции) до 25 кг (в схеме HYBRIT). **Полученная продукция будет на 20-30% дороже.**

Летом 2018 г. стартовало строительство пилотного завода HYBRIT. Производственную площадку предоставил металлургический завод SSAB в Лулео (Швеция).

Общие затраты на пилотную фазу проекта – 1,4 млрд шведских крон (\$154 млн). 500 млн шведских крон (\$55 млн) выделило Swedish Energy Agency. Остальные средства инвестировали участники проекта (SSAB, LKAB и Vattenfall). Swedish Energy Agency ранее выделило 60 млн шведских крон (\$6,6 млн) на проведение исследований и технико-экономическое обоснование проекта.

Окончание пилотной фазы ожидается в 2024 г. **В 2026 г. планируется ввести в эксплуатацию опытный завод по производству «зеленого» железа прямого восстановления.** Первоначально его мощности составят 1,3 млн т губчатого железа в год, однако к 2030 г. они могут достигнуть 2,7 млн т.



SuSteel

SuSteel (Sustainable Steelmaking) – исследовательский проект Voestalpine и партнеров (K1-MET, Primetals, MUL). Ведется на заводе в г. Донавиц (Австрия).

Цель проекта – разработка технологии восстановления железной руды с использованием водородной плазмы. Водород выступает восстановительным агентом, а состояние плазмы обеспечивает энергию, необходимую для плавления железа.

Технология SuSteel позволит получать сталь напрямую из железорудной мелочи в специальной электродуговой печи.

Бюджет проекта – €2,6 млн. 60% средств получено от Austrian Research Promotion Agency (FFG).

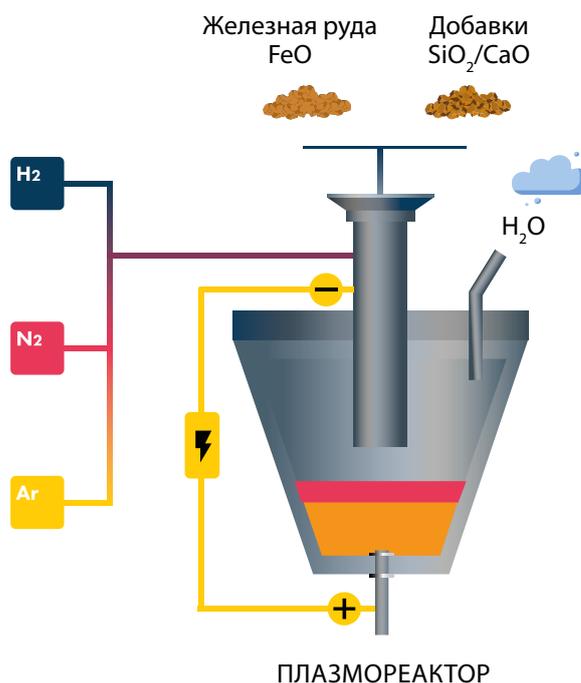
Проект находится на стадии масштабирования пилотной установки.

Параллельно с SuSteel развивается H2Future – совместный проект Voestalpine с партнерами (Siemens, VERBUND, Austrian Power Grid (APG), K1-MET, ECN). Цель проекта – промышленное производство «зеленого» водорода. В качестве технологии используется электролиз воды. В качестве источника энергии – избыточная возобновляемая электроэнергия, которая поступает в электросети

Проект стартовал 01.01.2017 г. и продлится 4,5 года. Бюджет проекта – €18 млн, из которых €12 млн предоставлено в рамках программы ЕС «Horizon 2020».

11.11.2019 г. на заводе Voestalpine в г. Линц (Австрия) запущена пилотная установка по производству водорода. Ее мощность – 6 МВт, производительность – 1200 м³ водорода в час. Сейчас водород поступает во внутренние газовые сети

Схема процесса SuSteel



завода, а затем в рамках тестов используется на разных стадиях производства стали.

Voestalpine исследует возможности по объединению традиционного производства (доменные печи, использующие кокс) с электродуговыми печами, получающими электроэнергию из альтернативных источников, в т. ч. за счет использования «зеленого» водорода.



H₂ Hamburg

H₂ Hamburg – проект ArcelorMittal по производству железа прямого восстановления с использованием водорода. Реализация проекта планируется на заводе в г. Гамбург. Этот завод уже занимается производством железа прямого восстановления с использованием природного газа. Использование водорода будет тестироваться на новой печи с годовым производством 100 тыс. т.

Бюджет проекта – €65 млн.

Вначале будет использоваться водород (чистотой более 95%), полученный путем разделения газов действующего завода. В дальнейшем завод сможет переключиться на «зеленый» водород.

В июле 2020 г. ArcelorMittal Bremen подписала договор с немецкой энергокомпанией EWE и ее дочерним предприятием wb (Stadtwerke Bremen) о создании производства «зеленого» водорода. На первой стадии будет построена установка по электролизу водорода мощностью до 24 МВт на площадке металлургического завода. Водород планируется поставлять на заводы ArcelorMittal.

SALCOS

SALCOS (Salzgitter Low CO₂ Steelmaking) – совместный проект Salzgitter и других организаций (Sunfire, Paul Wurth, Tenova, Avacon, Linde, Fraunhofer). Проект ориентируется на производство железа прямого восстановления с использованием водорода.

SALCOS предполагает создание собственного производства водорода (проект GrInHy) и собственных мощностей по генерации электроэнергии из водорода и ветра (проект WindH2).

В настоящее время заводы Salzgitter выбрасывают около 8 млн т CO₂ в год. **Реализация первой фазы проекта SALCOS (затраты – €1,2 млрд) позволит сократить выбросы CO₂ на 25% к 2025 г.**

В январе 2020 г. Salzgitter сообщил о намерении провести вместе с партнерами (Rhenus и Uniper) технико-экономическое обоснование строительства завода по производству DRI на основе водорода в прибрежной зоне. В случае положительных результатов исследования, партнеры начнут реализацию проекта. Цель – наладить годовое производство 2 млн т железа прямого восстановления.

В декабре 2020 г. Министерство окружающей среды Германии утвердило финансирование DRI-проекта Salzgitter (по сообщениям СМИ, объем госфинансирования составляет €5,3 млн). На первом этапе железо прямого восстановления будет использоваться в доменных печах для экономии угля, используемого в установках пылеугольного вдувания топлива, и в электродуговой печи на заводе в Пайне.

Для обеспечения проекта SALCOS водородом

развивается GrInHy (Green Industrial Hydrogen via reversible high-temperature electrolysis) – совместный проект Salzgitter с партнерами по производству «зеленого» водорода. Преимущество разрабатываемой технологии – использование в производстве водорода избыточного тепла, возникающего в ходе технологических процессов металлургического завода. В результате установка электролиза потребляет меньше электроэнергии.

В рамках **первой фазы** проекта построен и протестирован прототип установки электролиза номинальной мощностью 40 м³ H₂ в час (в нормальных условиях). Полученные результаты испытаний оправдали ожидания. Первая фаза проекта продолжалась с 01.03.2016 г. по 28.02.2019 г. **Ее бюджет составил €4,5 млн** (полностью профинансированы за счет ЕС).

Вторая фаза проекта (GrInHy 2.0) стартовала 01.01.2019 г. Ее цель – увеличить номинальную мощность установки электролиза в 5 раз. В июне 2020 г. Salzgitter приступил к тестированию установки по производству водорода.

Общий бюджет GrInHy 2.0 – €5,5 млн. Ожидается, что до конца 2022 г. установка GrInHy 2.0 произведет 100 т водорода, который будет использован в производственных процессах.

В мае 2020 г. стартовало строительство 7 ветровых турбин, составляющих Windpark Salzgitter. Они будут поставлять электроэнергию для производства «зеленого» водорода. Общая мощность турбин – 30 МВт. **Инвестиции в проект**, включая строительство турбин, водородного завода и сопутствующей инфраструктуры составят **\$56 млн.** ►►

GISH

GISH (Grid Interactive Steelmaking with H₂) – проект Миссурийского университета науки и технологий и Аризонского университета. В числе партнеров – Voestalpine, Nucor, Gerdau.

GISH демонстрирует систему производства стали, комбинирующую технологии производства железа прямого восстановления с электродуговой выплавкой стали вместе с производством «зеленого» водорода.

Проекту одобрено финансирование от Министерства энергетики США в размере \$4 млн.

Схема процесса GISH



HYFOR

HYFOR (Hydrogen-based Fine-Ore Reduction) – исследовательский проект, который осуществляют Primetals Technologies, voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Montan University Leoben и K1-MET. В рамках проекта разрабатывается технология восстановления железорудного концентрата с помощью водорода. Технология может работать с частицами размером менее 0,15 мм, в результате чего отпадает необходимость дополнительной подготовки руды после обогащения.

Планируется построить пилотный завод в Донавице. Завод будет включать три части:

- установка предварительного нагрева (в ней железорудный концентрат будет нагреваться до 900°C

и затем передаваться в установку восстановления);

- установка подготовки водорода;
- установка восстановления (в нее будет подаваться водород, который будет восстанавливать железо из концентрата; при этом система рекуперации отходящего тепла, которая использует тепло отходящих газов, обеспечит оптимальное использование энергии, а система сухой очистки от пыли снизит выбросы пыли в процессе производства).

Из установки восстановления выходит DRI с температурой около 600°C, которое может подаваться в электродуговую печь или использоваться для производства горячебрикетированного железа.

Электролиз

SIDERWIN

SIDERWIN (ранее – ULCOWIN) – проект, который координирует ArcelorMittal Maizieres Research SA (Франция). В основе проекта – восстановление железной руды путем электролиза. Когда железная руда погружается в электролитическую ванну (ванну с двумя электродами, через которые проходит электрический ток), железо притягивается к одному электроду, а кислород – к другому.

Преимущество технологии SIDERWIN:

- сокращение прямых выбросов CO₂ на 87%;
- сокращение прямых энергозатрат на 31%;
- возможность производить сталь из побочных продуктов цветной металлургии, богатых оксидами железа;
- способность работать в гибком режиме пуска/остановки, приспособившись к поступлению электроэнергии из альтернативных источников.

ArcelorMittal уже 12 лет работает над технологией электролиза железа. За это время реализовано 5 пилотных проектов в этой сфере. Тесты показали, что для электролиза железа требуется меньше электроэнергии, чем для электролиза водорода из воды.

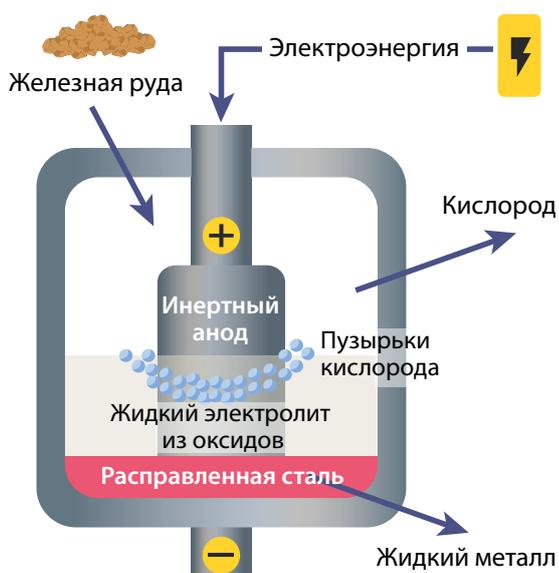
В настоящее время совместно с 11 партнерами ArcelorMittal работает над созданием новой 3-метровой пилотной установки. Для реализации текущей стадии проекта SIDERWIN (01.10.2017-30.09.2022) получено финансирование от ЕС в размере €6,8 млн.

Схема процесса SIDERWIN



Boston Metal

Схема процесса Boston Metal



Boston Metal развивает технологию электролиза железа. Предлагаемая схема производства:

1. Сырье (руда, концентрат или другой оксид), содержащий оксид железа, в твердом состоянии помещается в специальную камеру;
2. Оксид железа смешивается с другими, более стабильными оксидами, чтобы сформировать расплавленный электролит;
3. Через камеру пропускается электричество, которое расплавляет оксиды и восстанавливает железо;
4. Железо аккумулируется внизу камеры, где к нему могут быть добавлены другие металлы перед выпуском из камеры;
5. Кислород, который выделяется в процессе восстановления железа из оксида, выбрасывается в атмосферу.

В 2020 г. проект прошел стадию лабораторных исследований. На 2021-2022 гг. намечены полупромышленные исследования. Строительство первого завода промышленного масштаба запланировано на 2024 г.

Стартап активно привлекает венчурные инвестиции. В частности, в 2019 г. в рамках раунда А компания привлекла \$20 млн (в числе инвесторов – Breakthrough Energy Ventures, аффилированный с Биллом Гейтсом). В 2021 г. в рамках раунда В Boston Metal привлек \$50 млн (в числе инвесторов – Piva Capital, BHP Ventures, Devonshire Investors). В марте 2021 г. стало известно, что стартап получил финансирование от венчурного фонда BMW. ▶▶

Прочие инициативы производителей стали и ЖРС в сфере декарбонизации

Компания	Планы/намерения
Liberty Steel	<p>Liberty Steel подписала меморандум о взаимопонимании с Paul Wurth и Stahl-Holding-Saar для строительства завода на основе водорода в Дюнкерке. Проект включает завод по прямому восстановлению железа годовой мощностью 2 млн т железа прямого восстановления с интегрированным подразделением электролиза водорода мощностью 1 ГВт.</p> <p>Первоначально завод по производству железа прямого восстановления будет использовать смесь водорода и природного газа, а в дальнейшем перейдет полностью на водород.</p> <p>Железо прямого восстановления/горячекрикетированное железо будет первоначально использоваться в электродуговых печах завода «Асковаль» во Франции. Избыток DRI будет поставляться на заводы Liberty в Острове и Галати, а также на заводы Stahl-Holding-Saar в Германии</p>
ArcelorMittal	<p>ArcelorMittal подписал меморандум с Vow ASA о строительстве завода по производству биогаза. Биогазовый завод собираются построить на площадке завода ArcelorMittal Rodange в Люксембурге. Ввод в эксплуатацию запланирован на 2023 г.</p> <p>Биогазовый завод будет работать на запатентованной технологии пиролиза Biogreen, предполагающей нагревание биомассы до высокой температуры. Выбрасываемые газы будут улавливаться и также превращаться в биогаз, который будет замещать природный газ в нагревательной печи завода Rodange. В процессе производства будет образовываться биоуголь, который также будет использоваться в производстве на металлургическом заводе</p>
ArcelorMittal	<p>ArcelorMittal совместно с Dastur Energy и MN Dastur & Co проведут исследование, направленное на разработку решения по улавлианию отходящих газов от доменной печи. Работа сфокусируется на разработке системы, позволяющей улавливать 50-70% CO₂ из доменного газа. Площадка для реализации проекта – завод ArcelorMittal Burns Harbor в Индиане. Бюджет проекта – \$1,9 млн, из которых \$1,5 млн выделит Министерство энергетики США</p>
Ovako	<p>В апреле 2020 г. компания протестировала водород для разогрева заготовок перед прокаткой. Водород заменил сжиженный газ. Ovako ожидает, что использование этого приема позволит снизить выбросы CO₂ на 20 тыс т ежегодно</p>
Nippon Steel	<p>Компания заявила о намерении ввести в эксплуатацию крупногабаритную электродуговую печь для производства «зеленой» стали в 2030 г. За ее счет Nippon Steel собирается заместить часть доменных мощностей. В качестве сырья для электродуговой печи будут использовать лом и железо прямого восстановления. Ожидается, что электродуговая печь будет работать на «зеленой» электроэнергии</p>
H2 Green Steel	<p>Компания инвестирует €2,5 млрд в строительство завода по производству безуглеродной стали в регионе Норрботтен, Швеция. Ожидается, что производство запустят в 2024 году. К 2030 году завод должен выйти на производство 5 млн т стали в год</p>
BHP и JFE Steel	<p>Компания будет заниматься изучением технологий по сокращению выбросов CO₂ в сотрудничестве с японским производителем стали JFE Steel. Стороны изучат свойства австралийского сырья и то, каким образом они могут помочь сократить выбросы, повысить эффективность производства в доменных печах. Инвестиции BHP в проект в течение пяти лет составят \$15 млн</p>
Mitsubishi Heavy Industries	<p>Планирует построить завод по производству «зеленой» стали на площадке Voestalpine в Австрии. Базовая технология – восстановление железной руды водородом. Производственные мощности предприятия – 250 тыс. т стали в год. Компания планирует начать тестовые операции на предприятии в 2021 году</p>
Rio Tinto, Nippon Steel	<p>Компании подписали меморандум о совместной работе над декарбонизацией. Основная цель сотрудничества – сократить выбросы CO₂ по всей цепочке создания стоимости стали</p>
POSCO, Fortescue	<p>Компании договорились о совместном производстве «зеленого» водорода на основе возобновляемых источников энергии</p>
Liberty Steel	<p>Компания намерена заменить четыре тандемные печи на две гибридные к 2023 году на заводе в Острава (Чехия). Экомодернизация позволит сократить выбросы CO₂ на 50%.</p>
BHP, Baowu	<p>В рамках пятилетнего сотрудничества стороны будут разрабатывать низкоуглеродные технологии и возможности снизить интенсивность выбросов парниковых газов в металлургическом производстве. В частности, BHP и Baowu изучат на базе китайского завода возможности использования технологии улавливания, использования и хранения углерода. Компании также будут сотрудничать в вопросе поиска низкоуглеродных источников топлива, в том числе водорода, для доменного производства стали. Инвестиции BHP в проект составят \$35 млн</p>
Dillinger и Saerstahl (SHS Group)	<p>Компании начали использовать в доменной печи водород, который выделен из коксовых газов на предприятии. Dillinger и Saerstahl инвестировали в реализацию проекта €14 млн</p>

Компании отрасли поставили амбициозные цели по сокращению выбросов

Опираясь на помощь государства, производители стали ставят амбициозные цели по сокращению выбросов CO₂. Свообразным бенчмарком для достижения карбонной нейтральности стал 2050 г. ■



Планы производителей стали по сокращению выбросов CO₂



Источники данных: данные компаний

В 2050-2070 гг. стальная отрасль кардинально изменит свой облик

По данным IEA, наиболее важные технологии снижения выбросов парниковых газов будут готовы для промышленного внедрения не ранее 2030 г. Поэтому цели по снижению выбросов до 2030 г. могут быть реализованы только за счет большего использования лома и мероприятий по повышению энергоэффективности.

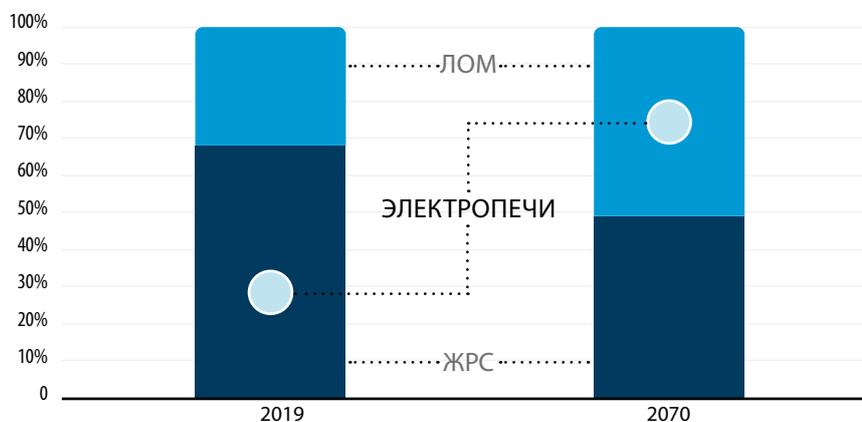
Сроки разработки технологий декарбонизации



Источник данных: IEA

Более широкое использование лома является самым доступным на данный момент способом снизить выбросы парниковых газов. Для развития электросталеплавильного производства в ряде регионов существуют благоприятные предпосылки, так как ожидается рост доступности лома.

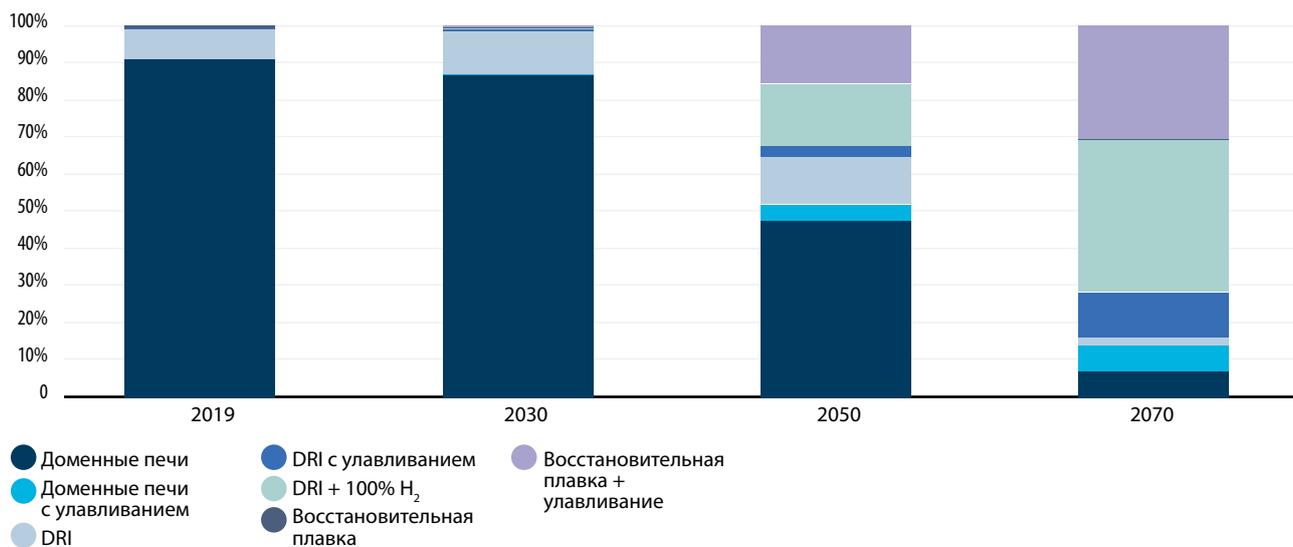
Структура производства стали в мире в разрезе видов сырья, %



Источники данных: IEA, Sustainable Development Scenario

IEA в Sustainable Development Scenario предполагает, что доля электростали к 2070 г. повысится до 75% с 29% в 2019 г. При этом доля стали, производимой из лома, составит только 51%. Разрыв между долей электростали и стали, произведенной из лома, представляет собой потенциал роста производства DRI – до 25% в общем объеме производства стали в мире и более 50% в общем объеме стали, произведенной с использованием ЖРС. То есть в металлургии будущего значительную роль продолжит играть ЖРС, но технологии производства в этом направлении существенно изменятся.

Прогнозная структура производства стали с использованием ЖРС, %



Источники данных: IEA, Sustainable Development Scenario

2021-2030 гг. До 2030 г. не ожидается существенных изменений в технологиях. В этот период будут сформированы условия для ускоренного развития производства DRI, доля которого в объеме производства стали с использованием ЖРС вырастет с 8% до 12%. Большинство разрабатываемых технологий к 2030 г. только выйдут на этапы промышленных испытаний. До 2030 г. основными способами снижения выбросов будет более широкое использование лома и реализация мероприятий по энергоэффективности.

2031-2050 гг. На более радикальные изменения можно рассчитывать в 2030-2050 гг. К 2050 г. доля традиционных доменных печей снизится до 48%. Значительное развитие получит технология DRI, которая займет до 32% в объеме производства стали из ЖРС. При этом большая часть будет производиться с использованием водорода вместо природного газа. Технологии улавливания не будут играть значительной роли в производстве DRI до 2050 г. Вероятно, в этом периоде платежи за выбросы в процессе производства DRI будут ниже, чем рост расходов, связанный с улавливанием. Технологии улавливания не займут значительной доли и в применении к доменным печам из-за трудностей, связанных с большим количеством источников выбросов и, соответственно, более низкой эффективностью улавливания. К 2050 г. заметную ►►

долю в объеме производства будут составлять технологии восстановительной плавки – 16%, что связано с более низкими производственными расходами, по сравнению с DRI.

2050-2070 гг. К 2070 г. облик отрасли будет совершенно иным. Традиционные доменные печи практически прекратят свое существование, их доля в объеме производства стали с использованием ЖРС будет минимальной – 7%, а в общем производстве стали – 3,5%. Технологии улавливания применительно к доменным печам не получат существенного распространения – 7% в общем производстве стали с использованием ЖРС. Практически все традиционные DRI-производства будут оснащены установками улавливания – 12%. Основной технологией производства стали из ЖРС станет DRI с использованием водорода – 41%. Суммарно технологии DRI займут 55% в общем объеме производства стали с использованием ЖРС. В течение 2050-2070 гг. почти удвоится объем производства методом восстановительной плавки с улавливанием и займет более 30%. То есть в 2070 г. сталь будет производиться или из лома, или из ЖРС с использованием водорода либо с применением технологий улавливания.

Основные способы декарбонизации металлургического производства



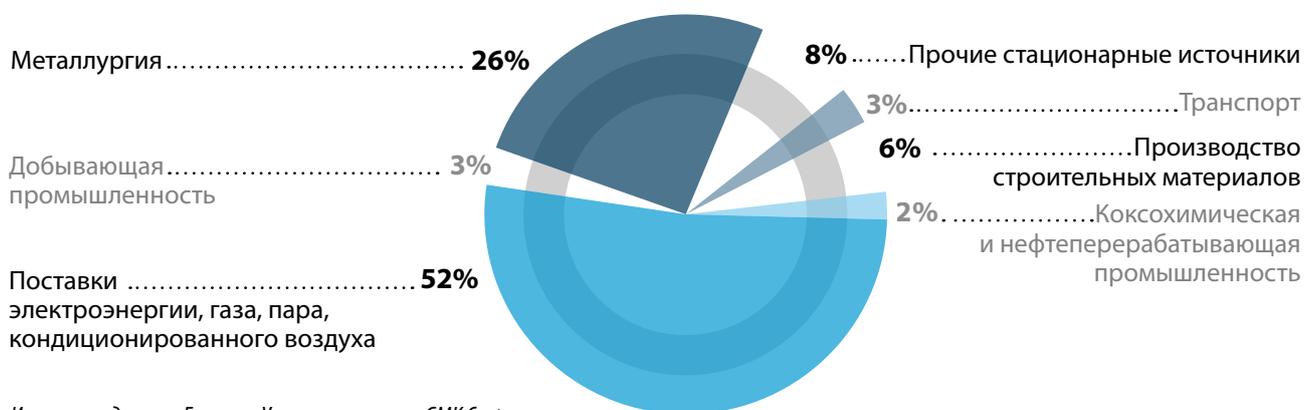
В перспективе большую значимость приобретет вертикальная интеграция с производством электроэнергии и водорода (вместо интеграции с производителями сырья). Ряд компаний, наряду с реализацией проектов по внедрению низкоуглеродных технологий в производстве стали, уже реализуют проекты или партнерства для производства водорода и генерации электроэнергии из возобновляемых источников. Примерами такого сотрудничества являются: партнерства ThyssenKrupp с RWE, а также со STEAG для производства «зеленого» водорода, партнерство ArcelorMittal Bremen и энергокомпании EWE, строительство Salzgitter собственного парка ветровых турбин, а также реализация R&D-проекта GrInHy, партнерство Posco и Fortescue для совместного производства водорода, «водородный консорциум» ArcelorMittal с 11 глобальными компаниями и др.

Прогнозы IEA показывают, что в глобальном масштабе безуглеродное производство стали достижимо только в перспективе 2070 г. Аналогичное мнение высказывают и представители World Steel Association, выражая сомнение в том, что даже ЕС сможет перейти к углеродно нейтральному производству стали к 2050 г. Сроки перехода будут зависеть от ряда факторов, не зависящих от металлургии, в частности от доступности электроэнергии и водорода и цен на них. ■

Украина – активный участник процесса декарбонизации

Украина также намерена следовать в направлении декарбонизации, хотя и более медленными темпами. В частности, в январе 2020 г. в Украине представлена Концепция зеленого энергетического перехода, где установлена цель: достичь углеродной нейтральности украинской экономики к 2070 г. При этом структура выбросов в Украине отличается от глобальной: **если в мире на металлургию приходится 6% выбросов CO₂, то в Украине – 26%**. Соответственно, роль металлургии в декарбонизации украинской экономики существенно выше, чем в среднем в мире.

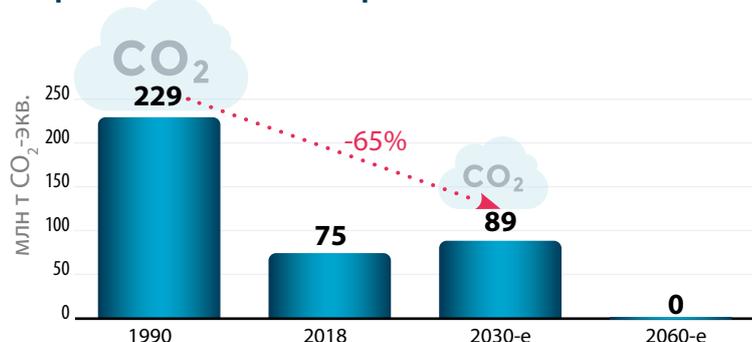
Структура выбросов CO₂ в Украине в 2019 г. в разрезе отраслей



Источники данных: Госстат Украины, расчеты GМК Center

В апреле 2021 г. представлен проект Второго Национально определенного вклада в выполнение Парижского соглашения (НВВ-2). Он предполагает, что **Украина к 2030 г. сократит выбросы CO₂ на 65% по сравнению с 1990 г.**, в том числе промышленные предприятия – на 61%. Отдельно для металлургии цель по снижению выбросов углекислого газа не установлена, но по результатам моделирования, которое проводилось в процессе разработки НВВ-2, ожидается, что на металлургию придется 88% общего сокращения выбросов парниковых газов в промышленности. Согласно результатам тех же расчетов, **для достижения этой цели металлургическим предприятиям необходимо суммарно инвестировать €7,7-8,3 млрд в течение 2021-2030 гг.**

Цели по сокращению выбросов CO₂ в промышленности Украины согласно НВВ-2

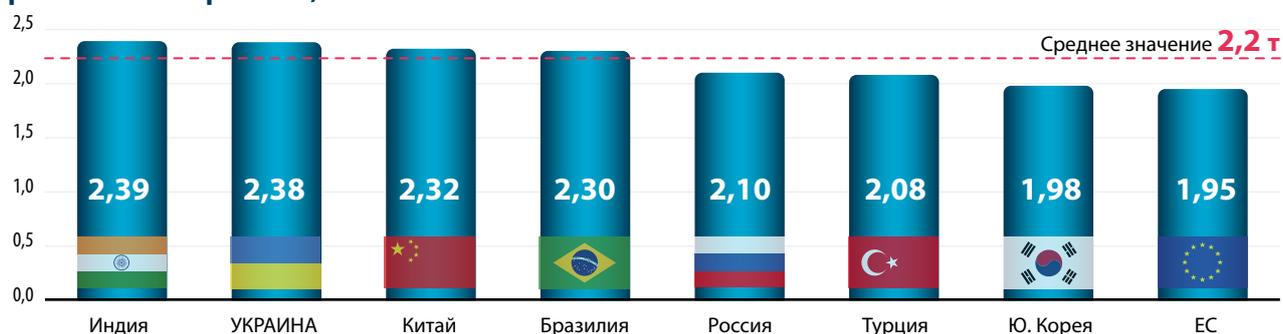


Источники данных: Министерство защиты окружающей среды и природных ресурсов Украины, расчеты GМК Center

НВВ-2 также устанавливает более жесткую цель по достижению углеродной нейтральности экономики, чем Концепция зеленого энергетического перехода: **2060 г. против 2070 г.** Соответственно, постепенно усиливаются ожидания по темпам сокращения выбросов CO₂ украинскими металлургическими предприятиями.

По состоянию на 2020 г. **удельные выбросы CO₂ производителей стали из Украины на 8% выше, чем в среднем в мире.** Это незначительная разница, и на данный момент это не создает рисков для бизнеса компаний, но говорит о большем потенциале снижения выбросов. Максимальные показатели выбросов по технологии «доменная печь – конвертер» только на 22% выше минимальных показателей. ▶▶

Удельные выбросы CO₂ производителей по технологии BF-BOF, прямые и непрямые, т/т стали



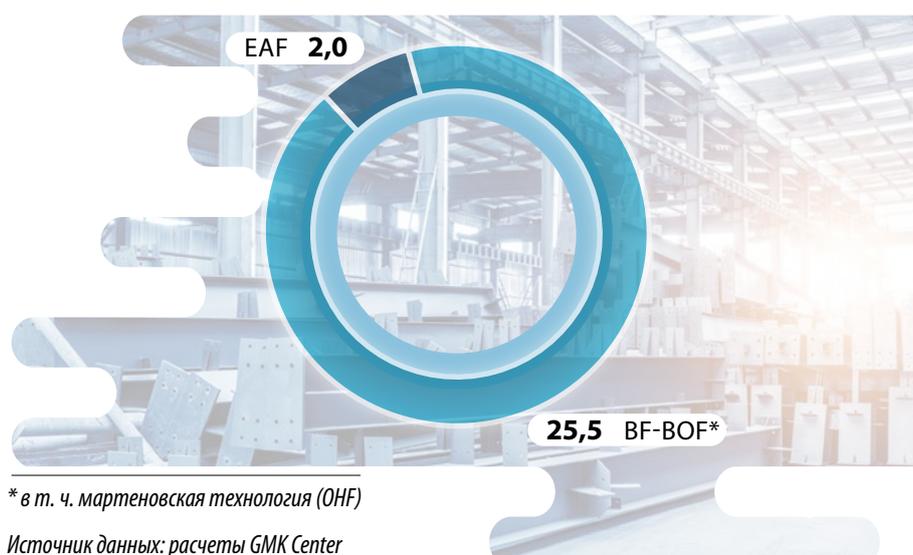
Источники данных: данные компаний, данные СМИ, расчеты GMK Center

Однако амбициозные планы глобальных металлургических компаний по достижению углеродной нейтральности к 2050 г. оказывают давление на украинские металлургические предприятия. Чтобы успешно конкурировать на внешних рынках, украинским производителям также необходимо иметь цели по сокращению выбросов CO₂ и стратегии декарбонизации.

Введение СВМ (Carbon Border Adjustment Mechanism) в ЕС – дополнительный фактор, подталкивающий украинские предприятия к декарбонизации, так как под угрозу ставится доступ к европейскому рынку. Если украинские производители не будут сокращать выбросы CO₂, то их продукция станет неконкурентоспособной из-за дополнительных СВМ-платежей.

Исходя из заявленных проектов и бенчмарков, исследованных выше, достижение карбонной нейтральности будет стоить производителям стали \$1 тыс. на тонну конвертерных мощностей. Объем конвертерных и мартеновских мощностей в Украине составляет 25,5 млн т в год. Следовательно, **декарбонизация потребует от металлургических предприятий Украины \$25 млрд капитальных инвестиций. Основная нагрузка при этом придется на 2030-2070 гг.**

Структура сталеплавильных мощностей в Украине, млн т



25,5 млн т

конвертерные
и мартеновские мощности

\$1000

капитальные инвестиции
на тонну мощности

\$25,5 млрд

инвестиции для достижения
углеродной нейтральности
производителей стали
Украины

Украина, как страна с развивающейся экономикой, не может быть лидером процесса декарбонизации. Украинские компании, по объективным причинам, не могут самостоятельно разрабатывать новые технологии производства стали. Поэтому полноценная декарбонизация украинской металлургии сможет начаться тогда, когда на рынке появятся уже готовые к внедрению безуглеродные технологии. В краткосрочной перспективе украинские компании могут снизить выбросы CO₂ за счет повышения энергоэффективности.

Риски и возможности декарбонизации металлургической отрасли Украины

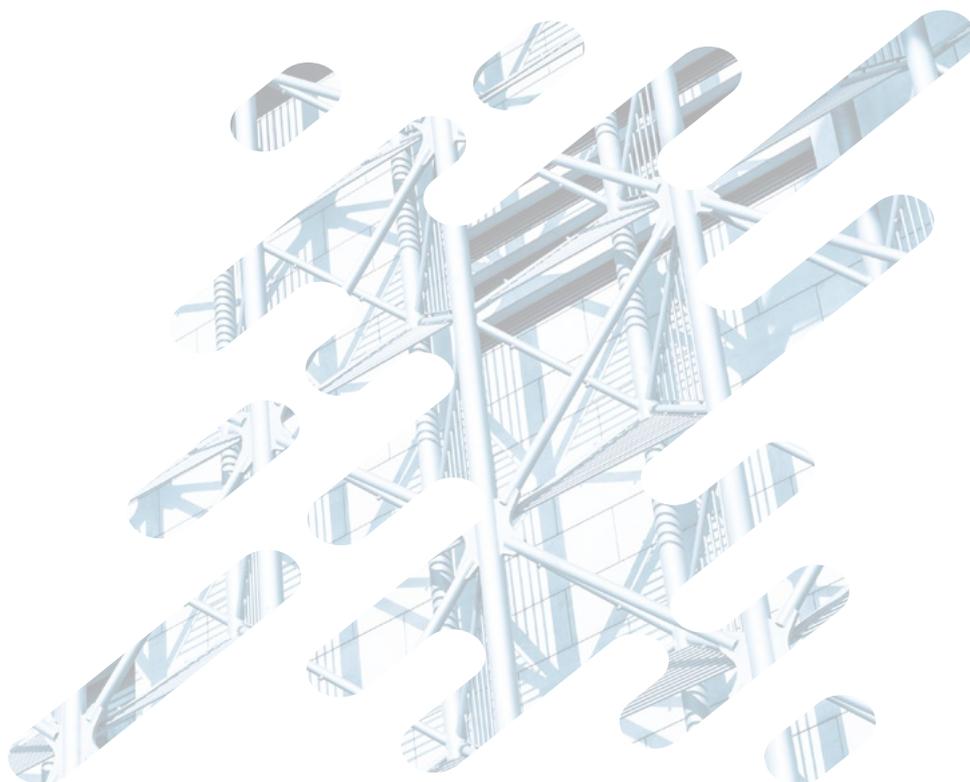
Риски

- 1 | Возможности по развитию электрометаллургии в Украине ограничены из-за недостаточных ресурсов лома, что связано со слабыми инвестиционными процессами в экономике.
- 2 | Процесс декарбонизации как металлургии, так и энергетики – капиталоемкий процесс. Трудности с финансированием могут негативно влиять на устойчивость компаний
- 3 | Задержка в развитии «зеленой» энергетики и производства «зеленого» водорода могут снизить конкурентоспособность украинской металлургии, так как доступ к дешевой электроэнергии будет ключевым преимуществом.
- 4 | Успех процесса декарбонизации напрямую зависит от проводимой государством политики. Чрезмерная фискальная нагрузка и отсутствие стимулов будут тормозить процесс декарбонизации Украины.

Возможности

- 1 | Развитие электрометаллургии на основе DRI, для чего необходимы инвестиции по всей цепочке (производство ЖРС, строительство электропечей, производство водорода).
- 2 | Привлечение европейского финансирования в рамках Green Deal, доступ к фондам, формируемым за счет СВМ-платежей.
- 3 | Активное развитие низкоуглеродной дешевой электроэнергии и производства водорода. Ставка на применение технологии восстановительной плавки, хотя на данный момент перспективы ее применения не определены.
- 4 | Если Украина стремится достичь таких же результатов в сфере декарбонизации, как и ЕС, то должна использовать и такие же инструменты, как и ЕС.

Следует учитывать, что благодаря конкурентным преимуществам (запасам железной руды, квалифицированной рабочей силе, преимуществам в логистике) украинские поставщики успешно интегрировались в глобальные цепочки создания добавленной стоимости в металлургии, поэтому важно, чтобы в процессе декарбонизации украинские производители смогли сохранить свои рыночные позиции. ■





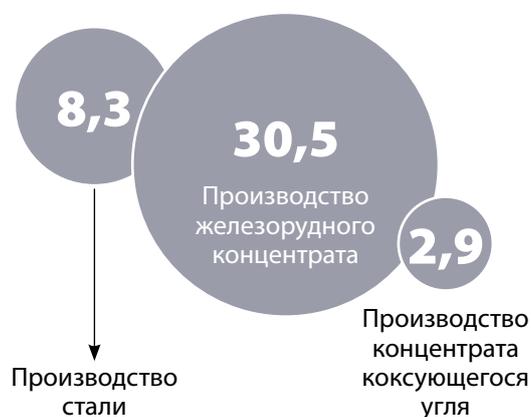
О Группе Метинвест

Метинвест — международная вертикально интегрированная горно-металлургическая группа компаний. В структуру группы входят добывающие и металлургические предприятия в Украине, Европе и США, а также сеть продаж во всех ключевых регионах мира. Мы контролируем всю производственную цепочку — от добычи руды и угля до производства полуфабрикатов и готовой продукции. Близость наших предприятий к ключевым железнодорожным линиям и портам позволяет оперативно поставлять сырье и металлопродукцию по всему миру.

Метинвест в цифрах, 2020 год



Ключевые операционные индикаторы, 2020 год (млн тонн)



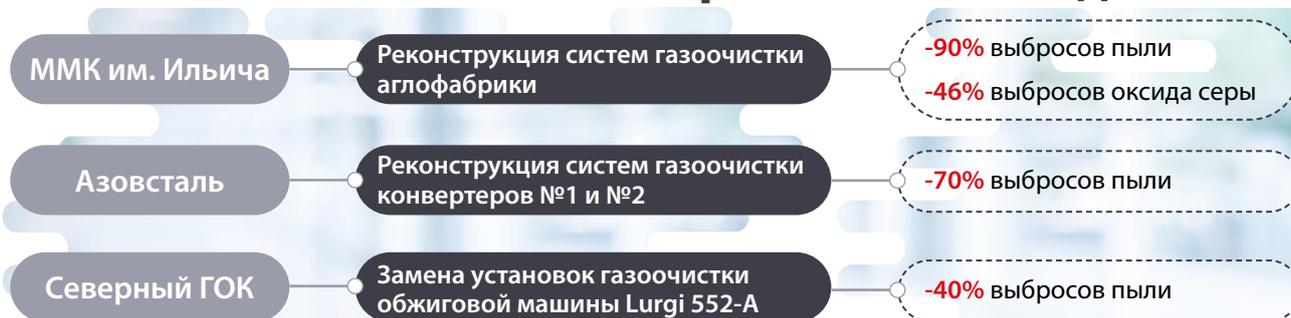
Социальная ответственность

Для Группы Метинвест социальная ответственность — это отвечать за свои действия и оценивать их влияние на местные сообщества. Во всех направлениях работы мы придерживаемся принципов устойчивого развития.

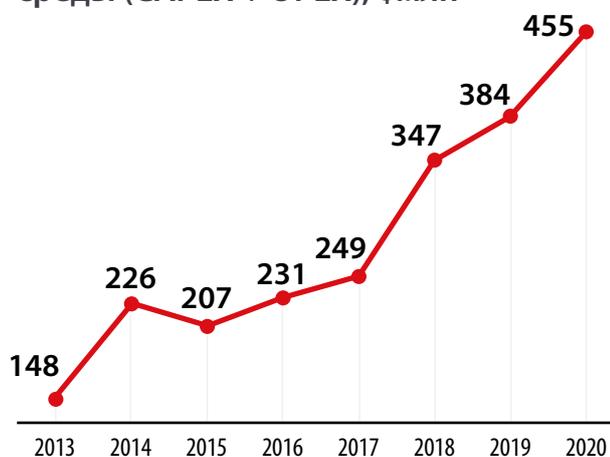


* с учетом совместных компаний и ассоциированных предприятий

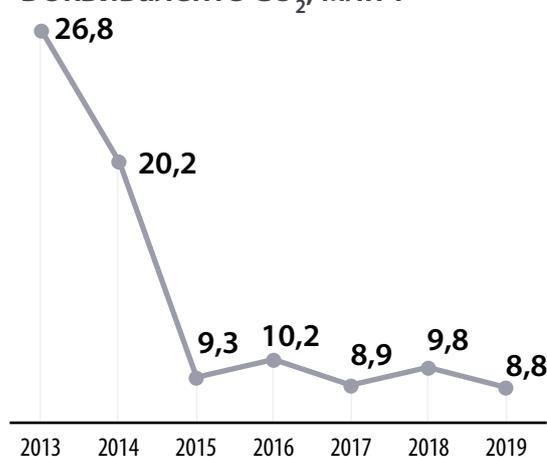
Ключевые экологические проекты 2020 года



Расходы на охрану окружающей среды (CAPEX + OPEX), \$млн



Общие выбросы парниковых газов в эквиваленте CO₂, млн т



ESG рейтинг Группы Метинвест



31,7

В апреле 2021 года агентство Sustainalytics улучшило ESG риск-рейтинг Группы Метинвест с 32,0 до **31,7** по шкале от 0 (самый низкий риск) до 100 (самый высокий риск).

Sustainalytics вновь оценило высокий уровень различных ESG-рисков, которым подвержена Группа Метинвест в силу особенностей металлургической отрасли в целом. При этом агентство улучшило свою оценку того, как Группа Метинвест управляет материальными аспектами в этой области. В агентстве Sustainalytics отметили высокое качество программ, практик и политик Группы Метинвест.



Sustainalytics отмечает, что общее раскрытие вопросов ESG Группы Метинвест соответствует лучшим практикам, что подразумевает высокую степень подотчетности всем заинтересованным сторонам.

ESG-отчетность Группы Метинвест готовится в соответствии со стандартами **Global Reporting Initiative (GRI)** и методическими рекомендациями **Sustainability Accounting Standards Board (SASB)**. ■

Станислав ЗИНЧЕНКО: «Украине следует использовать все лучшие практики в политике декарбонизации»



Станислав Зинченко,
директор GMK Center,
глава комитета промышленной
экологии и устойчивого
развития Европейской
бизнес-ассоциации

Наше исследование показывает, что декарбонизация – не сиюминутная мода. Декарбонизация – это глобальный тренд. Он коснется всех субъектов экономики и промышленности, а не только металлургических заводов, которым необходимо увеличивать объемы капитальных инвестиций для сокращения выбросов CO₂.

Декарбонизация металлургии потребует прежде всего поставок углеродно нейтральной электроэнергии. Поэтому **электроэнергетика станет первой отраслью, ставшей на путь низкоуглеродного развития.** Огромную работу предстоит проделать научно-исследовательским организациям, чтобы разработать новые низкоуглеродные технологии производства стали. Производителям оборудования и инжиниринговым компаниям необходимо найти технические решения, позволяющие применять новые технологии в промышленных масштабах. **Потребители должны быть готовы к росту цен на металлопродукцию** и осознавать, что дополнительные расходы – это плата за новую экономику, соответствующую принципам устойчивого развития.

Но особая роль в декарбонизации отводится государству как системе официальных институтов власти. На государство возложены обязанности по стимулированию развития экономики и улучшению состояния окружающей среды. **В руках государства сосредоточены все инструменты экономической политики (от регуляторных до фискальных), и поэтому от его действий зависит, с какой скоростью и результативностью будет происходить декарбонизация.**

В ЕС активно реализуется системная государственная политика для декарбонизации экономики. При этом, общаясь с европейскими металлурга-

ми на международных конференциях, мы слышим об их неудовлетворенности действиями Еврокомиссии и национальных органов власти. До последнего времени политика ЕС в сфере декарбонизации сводилась в большей степени к ограничительным и фискальным мерам, но кардинальных изменений так и не произошло. В конце 2019 г. акцент сместился – Еврокомиссия разработала масштабный инвестиционный план, ориентированный на переход экономики к углеродно нейтральному статусу, который вселяет осторожный оптимизм.

Украина пытается идти в фарватере европейских тенденций. На этом пути очень важно не повторять чужие ошибки и использовать только самые лучшие и эффективные алгоритмы действий. Европейский Союз опережает Украину в процессе декарбонизации, но благодаря этому мы можем использовать уникальный передовой европейский опыт.

Украина – индустриальная страна. Мы надеемся, что такой она останется и в будущем. Для этого **процесс декарбонизации должен быть созидательным, а не деструктивным.** Ведь декарбонизация может создавать условия для появления и развития новых предприятий, отраслей и рабочих мест. Но в то же время декарбонизация может приводить к ликвидации целых отраслей, если пойти по пути запретов и ограничений, предоставляющих, по факту, преимущества нашим конкурентам.

Мы рассчитываем, что наше исследование позволит всем стейкхолдерам изменений разобраться в декарбонизации и превратить ее в созидательный процесс. Декарбонизация формирует металлургию будущего. И это будущее зависит от наших совместных усилий. ■

Контактная информация

Horst Wiesinger Consulting GmbH

FN 210327
Straßerau 6, 4020 Linz, Austria
+43 732 7804402

Директор **Доктор Хорст ВИЗИНГЕР**

+43 732 7804402
office@hwcon.com

ООО «ГМК-Центр»

ЕГРПОУ 42306047
01024, Украина, г. Киев, ул. Шелковичная, 42-44
+38 044 333 76 18

Директор **Станислав ЗИНЧЕНКО**

+38 044 333 76 18
s.zinchenko@gmk.center

Главный аналитик **Андрей ТАРАСЕНКО**

+38 044 333 76 18
a.tarasenko@gmk.center

**Аналитик,
кандидат экономических наук** **Андрей ГЛУЩЕНКО**

+38 044 333 76 18
a.glushchenko@gmk.center

Данный отчет может быть использован только в информационных целях. Приведенные в отчете аналитические исследования, выводы являются достоверными только с учетом указанных предположений и ограничительных условий. Выводы и рекомендации являются личными, беспристрастными и профессиональными суждениями сотрудников ООО «ГМК-Центр». Сотрудники ООО «ГМК-Центр» не имеют личной или финансовой заинтересованности в предмете исследования. Исследования базируются на информации из общедоступных источников, в том числе средств массовой информации и сети Интернет. ООО «ГМК-Центр» считает эту информацию достоверной и не проводит независимую проверку ее точности и полноты. ООО «ГМК-Центр» не несет ответственности за достоверность использованной информации. Приведенные в отчете выводы актуальны лишь на дату отчета. Изменение рыночных, макроэкономических, политических условий может привести к значительным изменениям результатов исследования.

Отчет предназначен для использования исключительно в качестве целого документа. Разделение или изменение любого раздела или страницы запрещены и делают отчет недействительным.



Київ 2021