

**Ю.Г. Ярошенко**

*Уральский федеральный университет  
им.первого Президента России Б.Н.Ельцина,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор,  
Екатеринбург*

**Я.М. Гордон**

*директор департамента технологий черной  
металлургии инженерно-консалтинговой  
компании «НАТСН»,  
профессиональный инженер провинции  
Онтарио (Канада),  
доктор технических наук, профессор,  
Торонто*

## **ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И ЧУГУНА - БАЗА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ**

Экономический анализ состояния черной металлургии в мире и России с указанием целей и путей развития этой важнейшей отрасли на ближайшие годы представлен в монографии В.С. Лисина<sup>755</sup>. Во многом идеология этой работы нашла отражение в основном документе, который определяет перестройку черной металлургии России<sup>756</sup>.

Тип процесса производства железа определяет конфигурацию всего металлургического комплекса. На рис.1 представлены четыре возможных варианта производства жидкой стали. Эти варианты наглядно показывают, что в зависимости от схемы производства чугуна или металлизированного железа, сталеплавильный процесс базируется на использовании: а) конвертеров, работающих на жидком чугуне доменной плавки, с продувкой ванны кислородом; б) электродуговых печей, работающих на твердой завалке; в) электродуговых печей, шихта для которых включает твердый металлизированный продукт, полученный прямым восстановлением из концентратов и рудной мелочи; г) электродуговых печей, работающих с использованием жидкого чугуна бескоксовой плавки и твердом металлизированном продукте – железе прямого восстановления и горячее брикетированном железе.

Первый и второй варианты отражают традиционные технологии выплавки чугуна и стали, третий и четвертый – активно развивающиеся альтернативные методы получения железа и чугуна (АМПЖЧ).

Доменное производство чугуна с последующим производством стали кислородно-конвертерным способом продолжает оставаться основным путем получения стали и ее сплавов. Основной сырьевой материал для такой технологии – жидкий чугун, выплавляется в доменной печи, работа которой требует использования нескольких видов подготовленного сырья: железорудного агломерата, железорудных окатышей и металлургического кокса. В связи с истощением запасов богатого железорудного сырья и коксующихся углей обеспечение доменной печи сырьевыми материалами все больше и больше усложняется.

<sup>755</sup> Лисин В.С. Стратегические ориентиры экономического развития черной металлургии в современных условиях. М.: Экономика, 2005, 404 с.

<sup>756</sup> Стратегия развития металлургической промышленности России на период до 2020 года. Приказ Министра промышленности и торговли Российской Федерации 18 марта 2009 г., № 150.

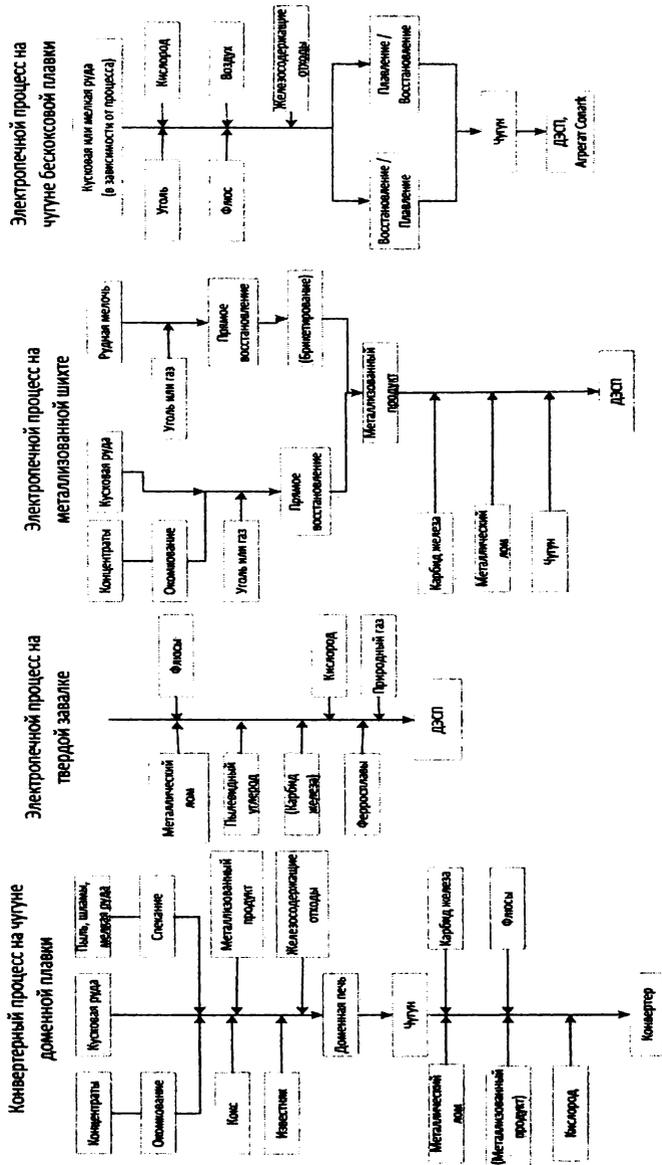


Рис. 1. Конфигурация металлургического завода в зависимости от процесса производства чугуна и металлизированного железа

Улучшение качества бедных руд на первый взгляд решается технически относительно просто путем более глубокого их обогащения. Однако не следует забывать, что при этом увеличиваются отходы, для размещения которых необходимы значительные площади. Кроме того, полученные железорудные концентраты требуют окомкования, а это связано с установкой дополнительного оборудования и, как следствие, с увеличением энергоемкости производства окатышей в сравнении с процессом агломерации.

Дефицит коксующихся углей технически полностью разрешить путем вовлечения в шихту коксовых батарей некоксующихся углей с осуществлением новых методов коксования – TISSENI SCOPE-21 не удастся. В результате возникают достаточно большие проблемы в развитии доменного производства. Применение для замены части кокса в доменной плавке комбинированного дутья с использованием пылеугольного топлива (ПУТ), природного газа или мазута, несмотря на значительное сокращение удельного расхода кокса не в состоянии заменить его роль дренажной насадки и участника процесса восстановления  $\text{CO}_2$ .

Дополнительные стадии подготовки компонентов шихты доменной плавки в случаях дефицита богатых железных руд и коксующихся углей приводят к росту себестоимости передельного чугуна, в результате чего уменьшается рентабельность доменного производства и, как следствие, снижается конкурентоспособность производимой металлопродукции.

Складывающаяся обстановка, обусловленная проблемами подготовки железорудного сырья и кокса, привела к необходимости разработки и развития альтернативных методов производства железа и чугуна, основанных на использовании природного газа, некоксующихся углей и минимальных требований к железорудным материалам с точки зрения их агломерации и окомкования. Подобные процессы называют также бездоменными или бескоксовыми, тем самым, подчеркивая их обособленность по отношению к доменному процессу.

Развитию этой области технологий черной металлургии – металлургии железа, по мнению проф. Ю.С. Юсфина<sup>757</sup>, способствуют такие факторы, как рост доли техногенного сырья в металлургической шихте, загрязненного Zn, Pb, Cl, Na, K и пр., ужесточение экологических требований к металлургическим технологиям, возможность использования агрегатов АМПЖЧ для комплексного использования железорудного сырья, а также переработки экологически опасных отходов. Более подробные сведения о металлургии железа можно получить в работах<sup>758</sup>.

Относительно молодые технологии металлургии железа активно развиваются. За последние 50 лет, практически с нуля, уровень мирового производства металла в бескоксовой металлургии только по основным технологиям – MIDREX (Мидрекс) и HIL(Хил), вращающиеся печи и печи с кипящим слоем, в 2010 г. составил 70,37 млн. т металлургического продукта. В России производ-

---

<sup>757</sup> Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа: учебник для вузов - М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.

<sup>758</sup> Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Указ. соч.; Курунов И.Ф., Савчук Н.А. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа. М.: АО «Черметинформация», 2002, 198 с.; Вегман Е.Ф. и др. Металлургия чугуна: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин, И.Ф. Курунов, А.Е. Пареньков, П.И. Черноусов. / Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с. : с ил.; Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии. Екатеринбург: АНО «УЦАО», 2012. – 655 с.

ство металлургического производства организовано в Старом Осколе с использованием окатышей из концентратов руд Курской магнитной аномалии. В соответствии с «Стратегией развития металлургической промышленности России на период до 2020 года»<sup>759</sup>, производство металлургических окатышей и горячего брикетированного железа на предприятии этого города увеличится с 3,4 млн. т/год до 9,4 млн. т/год в 2020 г. Темпы развития производства металла, использующие альтернативные методы, не только в нашей стране, но и в мире опережают средние по черной металлургии.

К причинам, вызвавшим развитие альтернативных способов получения первичного железистого продукта, следует отнести: возросшие требования к качеству металла, особенно к его чистоте и к потребительским свойствам металлопродукции – прочности, пластичности; коррозионной стойкости и др. Такой металл и изделия из него могут быть получены лучше всего из первородной шихты; существенное сокращение, а некоторых регионах полное истощение запасов коксующихся углей; стремление к использованию железных руд без специальной их подготовки к плавке – обогащения, окомкования, агломерации и пр.; возрастающие требования к решениям экологических проблем, побудившие к созданию мини-заводов, использующих технологии производства металлопродукции, приближенных к экологически чистым; возможность реализации альтернативных технологий на мини-заводах, которые не только лучше приспособлены к рыночной экономике, но и более привлекательны для малых стран; стремление упростить традиционные схемы получения чугуна и стали за счет исключения коксохимического производства и производства чугуна в доменных печах.

Основные АМПДЖЧ, разработанные к настоящему времени и находящиеся, по крайней мере, на стадии демонстрационных установок, могут быть также условно разделены на 4 группы по виду применяемого основного топлива и вида железорудного материала. Все процессы получения металлургического железа, чугуна или полупродукта размещены на рис. 2 в 4 квадрантах, образованных осями «Концентрат – Окатыши» (ось абсцисс) и «Уголь-Природный газ» (ось ординат). Деление железорудных материалов осуществлено по крупности железорудного сырья и степени его подготовки. Доменная печь, технологии металлургической в шахтных печах и процесс Cogex требуют использование обожженных окатышей, кусковой руды. (Агломерат используют, наряду с окатышами и рудой, только в доменной плавке). Процессы в кипящем слое, включая процесс Circofer, используют мелкую руду с эквивалентным диаметром кусков менее 10 мм или крупный концентрат, размер частиц в котором более 0,125 мм. Остальные процессы могут использовать как подготовленные в результате высокотемпературного обжига материалы (окатыши), так и не прошедшие высокотемпературный обжиг материалы: кусковую и мелкую руды, а также концентрат.

Процессы, представленные в квадрантах 1 и 2, а также процессы Circofer и реализованные во вращающихся печах, находящиеся в 3-м квадранте, относятся к твердофазным процессами прямого получения железа.

Некоторые процессы, использующие уголь как восстановитель и относящиеся к 3 и 4 квадрантам, также применяют газовое или жидкое топливо для отопления печных агрегатов, в которых протекают процессы восстановления. К

---

<sup>759</sup> Стратегия развития металлургической промышленности России на период до 2020 года. Приказ Министра промышленности и торговли Российской Федерации 18 марта 2009 г., № 150.

таким технологиям относятся процессы ITmk3 и процессы во вращающейся печи с плавильным агрегатом. Доменная печь также может использовать природный газ, коксовый газ, мазут или очищенный от диоксида углерода колошниковый газ в качестве заменителя кокса.

Доменный процесс и процессы Ромелт, Tesnored относятся к одностадийным технологиям, которые обеспечивают в одном и том же агрегате как металлизацию железорудной части шихты в твердом состоянии, так и окончательное восстановление, плавление и карбюризацию жидкого металла. Остальные технологии, представленные в 3 и 4 квадрантах, являются двухстадийными, в которых процессы металлизации в твердом состоянии и плавления с последующим довосстановлением в жидкой фазе происходят в различных агрегатах.

Процесс ITmk3 представляет собой исключение, поскольку расплавление металлизированного железа и разделение чугуна и шлака происходят в кольцевой печи с вращающимся подом в отсутствии ванны жидкого металла и шлака.

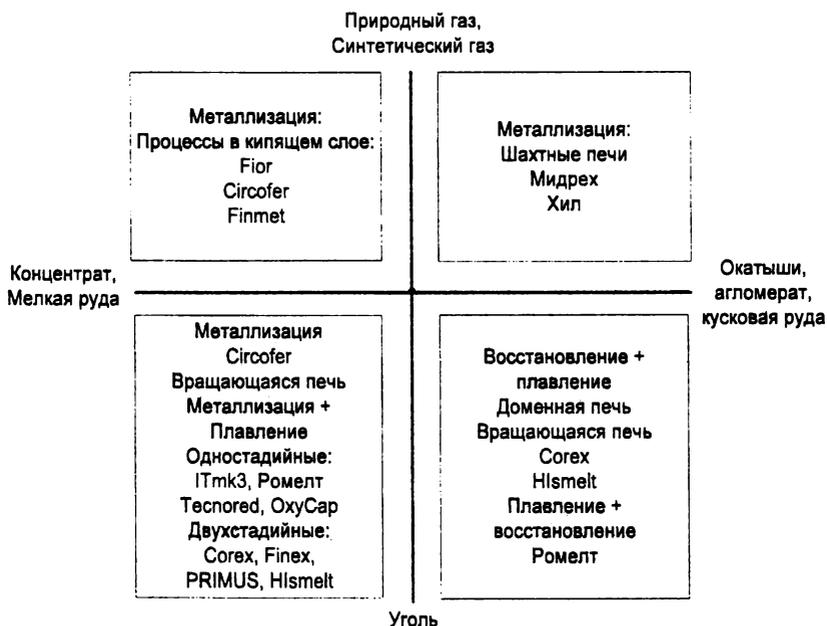


Рис. 2. Основные альтернативные процессы производства чугуна и восстановленного железа

В альтернативных технологиях, реализуемых в шахтных печах, в установках кипящего слоя, в кольцевых печах с вращающимся подом и трубчатых вращающихся печах, использующих окатыши, кусковую или мелкую руды, получают металлизированные окатыши (МО) или горячебрикетированное железо (ГБЖ прямо из оксидов железа, не допуская плавления, т.е. «прямо в твердом состоянии»), что и послужило основой названия данных процессов – процессами прямого получения железа

В процессах металлизации Tecnoled, а также в процессах, основанных на использовании кольцевой печи с движущимся подом (Fastmet, Redmet, Inmetco, ITmk3), в качестве исходного железорудного материала используются концентраты, которые перед загрузкой в печь металлизации интенсивно смешиваются с восстановителем – углем, а также с флюсами и связующими веществами и окомковываются. В итоге достигается равномерное распределение всех компонентов шихты, из которой формируют композитные рудо-угольные окатыши, брикеты или небольшие кирпичи. Хорошее смешение восстановителя с оксидами железа по объему окатыша, достаточно развитые поверхности концентратов, угля и флюсов, контакт с газовой средой рабочего пространства агрегата обеспечивают высокие скорости получения металлизированного железа.

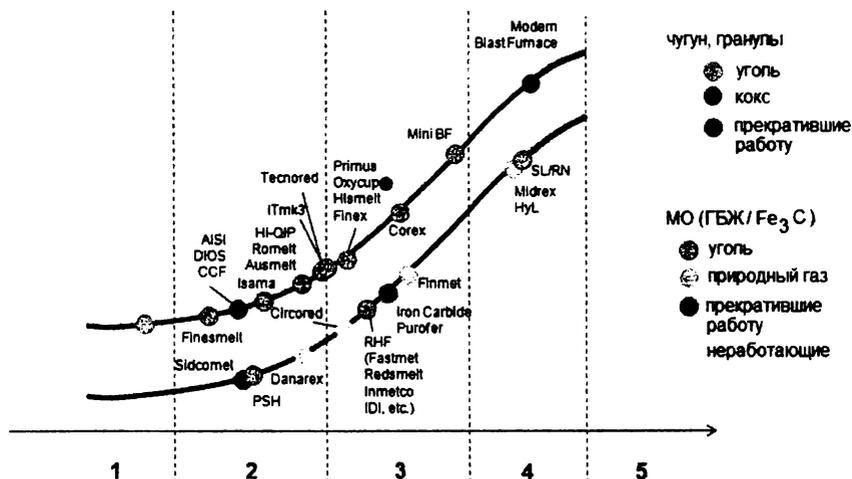


Рис. 3. Существующие в мире альтернативные технологии производства металлизированного железа и чугуна: 1 – Разработка концепции. Лабораторные исследования; 2 – Пилотные проекты и их развитие; 3 – Промышленное внедрение; 4 – Устоявшиеся технологии; 5 – Ожидание новых идей

Большинство существующих в мире процессов производства чугуна и металлизированного железа представлены на графике рис. 3 в зависимости от степени их разработки и внедрения. Из анализа сведений, приведенных на этом рисунке, следует, что подавляющее большинство технологий производства металлизированного железа до сих пор находятся в стадии пилотных проектов или полупромышленных испытаний. На стадии широкомасштабного применения реализованы технологии только в доменных печах, в шахтных печах, а также во вращающихся печах и печах с кипящим слоем, о чем свидетельствуют данные табл. 1.

Таблица 1

**Производство металлизированного железа по видам процессов**

Процесс	Шахтные печи	Вращающиеся печи	Печи с кипящим слоем
Производство, млн. т	51,91	18,2	0,34

Технологии получения металлического железа обычно реализуются при умеренных температурах ~ 700 – 900°C, с использованием газообразного или

твердого восстановителя в различных по конструкции агрегатах – шахтных печах, печах с кипящим слоем, трубчатых вращающихся печах, кольцевых печах с вращающимся подом, многоподовых печах и др. Тип топа или иного агрегата определяет особенности технологии, но не меняет ее основного принципа – получение металлизированного железа в твердом состоянии. Отсюда и название методов этой группы – методы твердофазного восстановления. Сложившаяся практика прямого получения железа в твердом состоянии по объемам производства принадлежит технологиям, использующим шахтные печи.

Между тем, выходят применение и другие технологии, конкурирующие с вышеназванной. Выбор той или иной технологии определяется технико-экономическим анализом, применительно к источникам сырья и топлива с учетом интересов потенциальных потребителей металлопродукции.

Представление о качестве получаемого продукта дают сведения табл.2.

Таблица 2

**Примеры качества металлизированного продукта**

Завод	Тип окатышей	H мет*	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	C	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S	P
Металлизированные окатыши (МО)											
ОЭМК	ЛебГОК	94,3	90,7	85,5	1,82	3,56	-	1,81	-	0,004	-
Trinidad	CVRD	94,6	93,1	88,1	1,69	1,55	0,74	0,97	0,32	0,004	0,003
Lazaro-Cardenas	Pena Colorado	95,0	90,0	85,4	2,60	3,10	1,22	0,95	0,68	0,005	0,046
Hamburg	QSM	95,5	92,6	88,4	1,94	2,20	0,52	0,63	0,42	0,004	0,015
Горяче-брикетированное железо (ГБЖ)											
ЛебГОК	ЛебГОК	93,3	90,4	84,3	1,13	4,23	-	1,19	-	0,010	-
Comsiga	FMO	93,0	91,9	85,4	1,60	1,70	0,95	2,17	-	0,0054	0,046

\* η мет - степень металлизации

Методы получения железа, реализуемые при высоких температурах с организацией одновременно в одном агрегате процессов плавления и восстановления железной руды, получили название – жидкофазные методы. В этих условиях тепло- массообменные процессы в расплаве протекают с высокими скоростями реакций восстановления оксидов железа и других металлов, что позволяет создавать агрегаты с высокой удельной производительностью. Такие агрегаты компактны по своим размерам, характеризуются высокой степенью использования рабочего пространства и, что не менее важно, хорошо оснащены теплотехническими средствами контроля и управления. Эти методы относятся к одностадийным. В качестве составляющих шихты могут быть использованы как отходы самого металлургического производства, так и другие техногенные отходы. Это расширяет сырьевую базу рассматриваемых технологий.

В результате последовательной организации двух процессов – получения металлизированного продукта методами твердофазного восстановления и последующего плавления этого продукта с целью получения жидкого чугуна возникли комбинированные методы (технологии) получения жидкого металла. Подобные технологии относятся к двухстадийным – восстановления и плавления. Их появление в 70-е гг. XX в. обязано с одной стороны успехам получения металлизированного железа в результате промышленного внедрения технологий твердофазного восстановления и с другой – неудачным в то время попыткам создать одностадийный плавильно-восстановительный процесс. Положение из-

менилось после того, когда совместными усилиями германской (KorfEngineeringGmbH) и австрийской VAI(VoestAlpineIndustrieanlagenbauAG) фирмами был разработан и промышленно опробована технология производства жидкого чугуна бескоксовым способом. Этой технологии было присвоено название КОРЕКС (COREX).

Металлургия железа интенсивно развивается. Об этом свидетельствуют возникшие в последнее время особенно в 90-е гг. XX в. и в начале XXI в. технологии производства металлizedанного сырья с различной степенью готовности к широкомасштабному внедрению. Востребованность на рынке качественных сталей, выплавленных из первородного сырья, не загрязненных примесями, стимулирует создание новых процессов прямого получения губчатого железа и чугуна. Конечно, по доли производства металла новые процессы в соревновании с технологией «доменная печь – конвертер» пока уступают. Однако, следует помнить, что для достижения высоких технико-экономических показателей современному доменному процессу, как и конвертерному потребовалось более 100 лет. При тех темпах развития металлургии железа, с которыми происходит становление этой молодой отрасли металлургии черных металлов, можно ожидать существенный рост выплавки стали из первородной шихты в ближайшие десятилетия. Каким альтернативным технологиям прямого получения железа и чугуна следует отдавать предпочтение? На этот вопрос однозначный ответ пока отсутствует.

Выбор способа получения металлizedанного железа определяется, прежде всего, потребностью в стали, выплавленной из первородной шихты для данного региона. Далее следует учитывать цены на топливо – природный газ или уголь, цены на железорудное сырье и затраты на его подготовку. При наличии дешевого природного газа и возможностей производства окатышей в качестве процессов бескоксовой металлургии могут быть использованы процессы МИДРЕКС (MIDREX) и ХИЛ (HIL), как наиболее изученные к настоящему времени. При отсутствии природного газа или его высокой стоимости производство металлizedанного железа может быть организовано с использованием угля. Способы, в которых основным энергоносителем и источником восстановительного газа является твердое топливо, в последнее время все больше и больше уделяют внимание. Перспективным в этом направлении являются технологии, реализованные в кольцевых печах с вращающимся подом. Особое место в металлургии железа занимают технологии производства чугуна. Они базируются либо на технологиях жидкофазного восстановления, либо на использовании комбинированных методов. В процессе их развития появляются новые технологии, отличающиеся друг от друга схемами подготовки угля и рудных составляющих к плавке, конструкциями плавильно-восстановительных печей, способами ввода в рабочее пространство мелкого угля, мелкой руды, воздуха, обогащенного кислородом, или технического кислорода и пр. Производство чугуна с использованием процессов бескоксовой металлургии, несомненно будет развиваться.

Эта тенденция, как отмечает проф. И.Ф. Курунов<sup>760</sup>, в будущем обеспечит решение следующих задач: вовлечение неподготовленного железорудного сырья и дешевых углей для выплавки с минимальными затратами первородного металла с последующим его использованием для получения качественных ста-

---

<sup>760</sup> Курунов И.Ф., Савчук Н.А. Состояние и перспективы бездомной металлургии железа. М.: АО «Черметинформация», 2002, 198 с.

лей в электропечах или конвертерах; вовлечение мелких железных руд или хвостов обогащения железных руд, которые неэффективно и экономически невыгодно подвергать окускованию и в дальнейшем использовать в доменном плавке; переработку различных металлургических отходов на металлургических предприятиях полного металлургического цикла, т.е. в месте их образования, с целью их утилизации и извлечения примесей цветных металлов, особенно цинка. Эти задачи обычно решают с учетом наличия и стоимости железорудных, энергетических и других ресурсов, необходимых для реализации той или иной бескоксовой технологии выплавки чугуна. При этом также следует принимать во внимание и наличие потребителей металла, и другие особенности экономического состояния регионов, а также перспективы их развития.

В сборник, посвященный юбилюру – профессору Владимиру Васильевичу Запарю, авторы статьи отобрали материал, связанный с новой областью черной металлургии, а именно – металлургией железа. Отобрали с надеждой, что юбиляр, как историк, проявит интерес к этой области знаний, и в будущем мы увидим очередную монографию, в которой будет отражена история черной металлургии сегодняшнего дня. Пожелаем ему на этом пути здоровья и творческих успехов!