

4. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Жоров А.Н., Гурулев Д.Н., Локтюшин В.А. Структурообразование в титано-алюминиевых композитах в присутствии жидкой фазы // Журнал функциональных материалов. 2008. Т. 2. № 4. С. 153 – 157.
5. S l a m a G., V i g n e s A. Coating of niobium and niobium alloys with aluminium. Part II. Hot-dipped coatings // Journal of the Less-common Metals. 1971. № 24. P. 1 – 21.
6. Шморгун В.Г., Трыков Ю.П., Слаутин О.В., Метелкин В.В., Богданов А.И. Кинетика диффузионных процессов в никель-алюминиевой композиции // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. № 4. С. 24 – 28.

© 2014 г. В.Г. Шморгун, Ю.П. Трыков,
А.И. Богданов, А.О. Таубе, Д.А. Евсτροφов
Поступила 17 декабря 2013 г.

УДК 669.046:536.421

В.П. Цымбал¹, С.П. Мочалов¹, А.А. Оленников¹, А.М. Огнев²

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²ОАО «Сибэлектротерм» (г. Новосибирск)

МИНИ-МЕТАЛЛУРГИЯ ПОЛНОГО ЦИКЛА НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССА СЭР – ОТ РУДЫ ДО СТАЛИ

Металлургия является одной из ключевых отраслей тяжелой индустрии (машиностроения, энергетики, строительства и т.д.) и может стать локомотивом для развития восточных регионов России и других мало обжитых районов. Однако ожидать крупномасштабных инвестиций для строительства традиционных металлургических заводов полного цикла вряд ли возможно, потому что мировая металлургия находится в достаточно сложном положении из-за гигантизма, многозвенности, больших энергетических и материальных затрат.

Например, в Америке в сколько-нибудь удовлетворительном экономическом состоянии находятся металлургические комбинаты, выпускающие широкополосный прокат и имеющие картельные соглашения с машиностроительными фирмами. Сортовой же прокат выпускается преимущественно на мини-заводах, которые являются более экономичными.

Российская металлургия в связи с укрупнениями и поглощениями заводов, произошедшими перед началом кризиса, нацелена главным образом на альянс с приобретенными зарубежными предприятиями. Главной целью крупных собственников металлургических предприятий является повышение капитализации, при этом некоторые российские заводы оказались по существу подсобными предпри-

ятиями зарубежных заводов. Это приводит к монополизму и диктату цен, что снижает эффективность работы отраслей, потребляющих металл. По некоторым позициям выпускаемый металл уступает зарубежному.

Некоторые российские металлургические заводы, в том числе Новокузнецке, находятся в сложном положении. Реконструкция их (так же как и строительство новых заводов полного цикла) требует очень больших капитальных вложений – порядка 700 – 800 долларов на тонну годовой производительности. В настоящий момент таких вложений не ожидается.

В то же время в Китае значительная часть металлургии является региональной. Она не связана с крупными мировыми металлургическими монстрами и решает главным образом задачи регионов. При этом эффективность этой металлургии значительно выше в связи с меньшими перевозками как сырья, так и готовой продукции.

Реальным направлением развития восточных районов страны является создание региональной металлургии и в России. К этой мысли постепенно приходят потребители металла. В частности, этот вопрос поднимался на совещании переработчиков металла, состоявшемся в г. Новосибирске в августе 2010 года, где было подчеркнуто, что машиностроительные заводы находятся в зависимости от крупных ме-

таллургических монополий, диктующих цены на металлопродукцию. Переработчики металла хотят уйти от этой зависимости через создание собственного металлургического производства. В связи с этим в России стали возникать мини-заводы, ориентированные на местные потребности, однако этот процесс скоро, по видимому, должен затормозиться из-за истощения ресурсов лома и роста его цены.

Определенной альтернативой традиционной металлургии являются процессы прямого твердофазного восстановления (Мидрекс, НуЛ-3 и др.), позволяющие получать металлизированные окатыши или брикеты, но по этим процессам перерабатываются только достаточно богатые руды. Комбинированный (твердо- и жидкофазный) процесс Корекс является довольно громоздким, его капиталоемкость соизмерима с доменным.

В последнее время большое внимание уделено роторному процессу ITmk3, но, скорее всего, его можно рассматривать как нагляднейший пример экстенсивного подхода, поскольку удельный объем этого агрегата больше, чем у домны и печи для процесса Корекса. Даже по данным авторов [1], капитальные затраты на него в два раза больше, чем на малую или мини-доменную печь, в качестве альтернативы которым этот процесс представляется. Что же касается энергетики, то даже не проводя каких-либо количественных сопоставлений, лишь на уровне теоретического анализа известных схем теплопередачи можно утверждать, что схема нагрева твердого материала в слое источником тепла сверху является далеко не самой эффективной, а процесс твердофазного восстановления в окомкованных частицах идет, по крайней мере, на порядок медленнее, чем жидкофазный. Это и выражается в необходимости большего времени пребывания частиц, а в конечном счете – в большем удельном объеме агрегата. Невысокая энергетическая эффективность этого процесса по сравнению с доменным подчеркивается также в работе [2].

Исключение стадии окомкования и перевод процесса в область газозвеси, а затем и эмульсии позволяет использовать большую реакционную поверхность исходных пылевидных материалов. Реализация этих условий открывает возможность создания агрегатов, имеющих очень малый удельный объем. Важным преимуществом процессов такого типа является возможность прямой переработки пылевидных материалов с малыми энергетическими затратами.

Этим условиям отвечает струйно-эмульсионный металлургический процесс (СЭР), отличающийся высокой скоростью протекания физико-химических процессов, малым удельным объемом агрегатов (в 10 – 15 раз меньшим, чем известные), меньшими (в 1,5 раза) энергозатратами, невысокими капитальными затратами (в 2 – 3 раза меньше). Этот процесс [3] полностью замкнут от атмосферы и имеет внутренний побудитель движения рабочей смеси в виде реактора-осциллятора с газодинамическим запирающим. При реализации, например, технологий прямого восстановления металлов отходящий газ может превращаться в энергетический или синтез-газ; таким образом, процесс может быть выполнен полностью бездымным.

С учетом отмеченных преимуществ процесс является наиболее приемлемым для переработки пылевидных металлосодержащих отходов, поскольку позволяет восстанавливать металл прямым путем, без промежуточных стадий, экологически чистым способом, с низкими энергетическими и материальными затратами.

Если учесть, что агрегат одновременно является и водогрейным котлом, так как работает на гарнисажном охлаждении (рис. 1), а газ может быть утилизирован в паровых или в газовых турбинах, то такие агрегаты могут быть выполнены энергонезависимыми и даже мобильными, что открывает возможность для освоения новых малообжитых районов.

Новый непрерывный металлургический процесс и агрегат разрабатывались по классическому принципу современных наукоемких технологий: концептуально-теоретическая постановка задачи; создание физико-химических и математических моделей, методик и систем инженерных расчетов технологических и конструктивных параметров; физическое моделирование; испытание отдельных элементов процесса и агрегата в производственных условиях; проектирование и строительство опытной крупно-масштабной установки с автоматизированным экспериментом для отработки различных вариантов технологий.

При разработке процесса и агрегата были использованы основные идеи теории самоорганизации [4, 5], результаты исследования кинетических, гидродинамических и термодинамических закономерностей сталеплавильных реакций и процессов [3, 6], теории газовых струй и свойства двухфазных течений [7], результаты математического моделирования и оптимизации сталеплавильных процессов, дополненные рядом оригинальных конструктив-

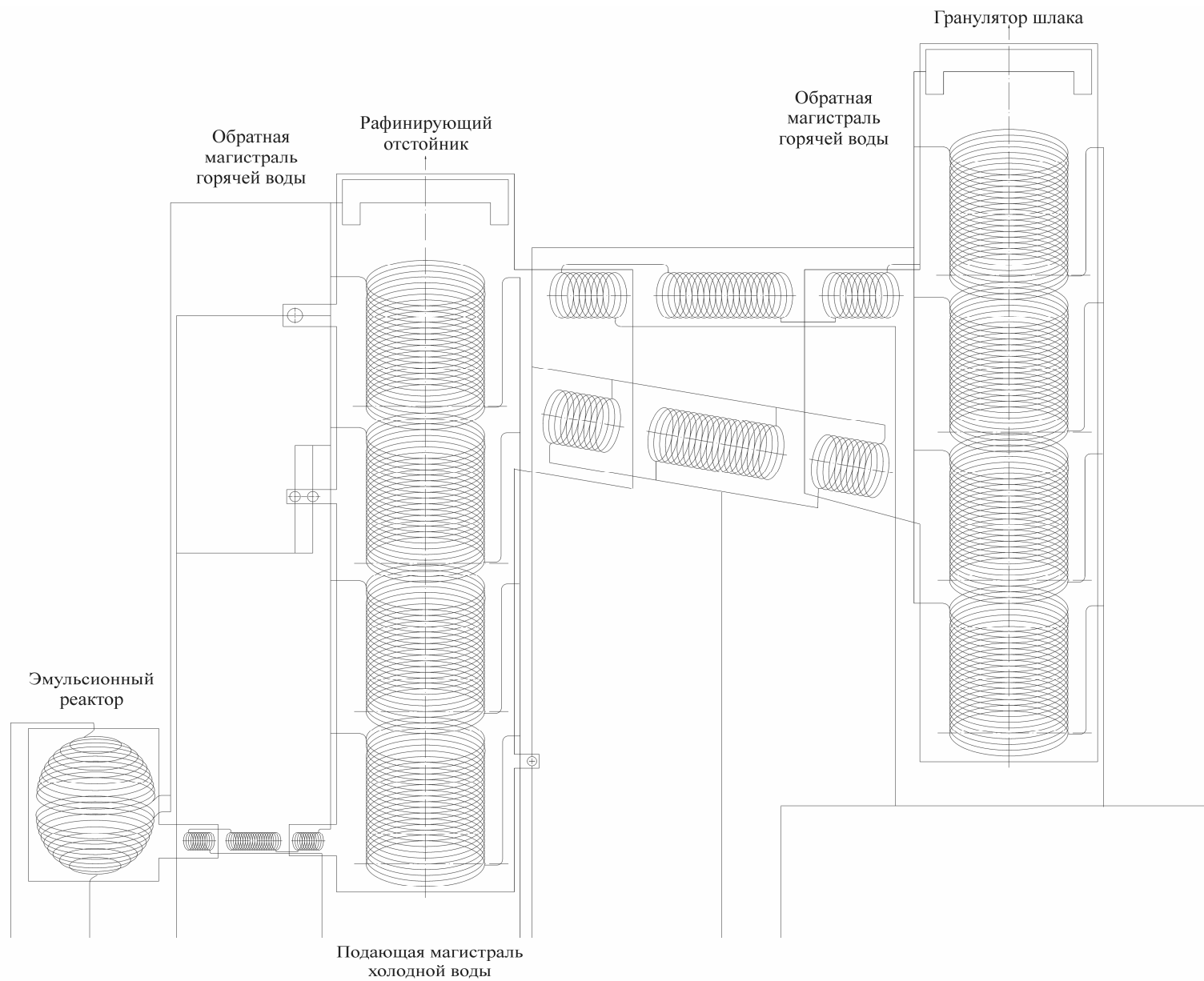


Рис. 1. Система гарнисажного охлаждения агрегата СЭР

ных и технологических решений [8]. Большую роль в развитии этих идей сыграла Брюссельская школа под руководством И. Пригожина. Процесс отладки технологии и элементов конструкции агрегата осуществлялся в 1992 – 2001 годах на крупномасштабной опытной установке, которая была смонтирована на свободных площадях конвертерного цеха ОАО «ЗСМК».

Перспективные направления по применению процессов и агрегатов типа СЭР обоснованы исходя из указанных выше преимуществ. В качестве основных, направленных на решение задач структурных изменений в металлургии, выделим следующие.

Создание мини-заводов новой структуры в виде независимых друг от друга и параллельно работающих типовых технологических модулей вместо последовательности крупных агрегатов многозвенного металлургического передела. Технологическая схема модуля приведена на рис. 2, а варианты планирования таких технологических модулей в сопоставлении со структурой традиционного металлургического завода представлены на рис. 3.

Реализация принципа непрерывности включает необходимость в тяжелом сменном оборудовании (сталеразливочных ковшах, мостовых кранах большой грузоподъемности, тяжелых фундаментах и т.д.). Агрегаты могут быть размещены в относительно легких зданиях, что позволяет быстро окупить вложенные средства. Модули могут работать независимо друг от друга и останавливаться в течение нескольких минут. Можно предложить три вида модулей.

1. **Технологический мини-комплекс** (см. модуль 1 на рис. 3) производительностью 250 – 300 тыс. т жидкого металла в год, включающий агрегат типа СЭР в составе двух последовательных реакторов, шлакоприемник с гранулятором шлака, агрегат доводки, агрегат совмещенной разливки с прокаткой или непрерывной вытяжки готовых профилей. В качестве последнего, например, предполагается использовать разработки и изобретения группы ученых Института теоретической и прикладной механики СО РАН г. Новосибирска, в которых используется принцип вертикальной непрерывной разливки (вытяжки) с применением жидкометаллических теплоносителей, позволяющих в 15 – 20 раз повысить скорость кристаллизации. Проблема здесь заключается в выборе и точном поддержании скорости вытяжки металла с учетом скорости затвердевания и обеспечении циркуляции жидкометаллического теплоносителя.

2. **В качестве второго варианта** (модуль 2 на рис. 3) может быть рассмотрена подобная технологическая схема прямого получения жидкого металла, но с выходом на суспензионную разливку и объемную кристаллизацию с получением, например, мелкофасонного точного литья. Реализация этого направления может изменить отношение к литым изделиям. Введение ультрадисперсных тугоплавких модификаторов в оптимальных количествах позволяет управлять числом зародышей и размером кристаллов в рамках объемной кристаллизации, что дает возможность получить прочностные свойства для литых изделий, не уступающие аналогичным свойствам изделий из прокатного металла [9].

Следует попутно заметить, что полученный нами методом прямого восстановления на опытной установке (пока в небольших количествах) металл обладает интересными (пока мало изученными) свойствами. В частности, он очень трудно поддается механической обработке, очень трудно режется как механическими, так и газовыми резаками. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что он не прошел через окислительные стадии обработки, самораскислен и даже модифицирован сверхравновесным содержанием углерода. Эти предположения требуют обстоятельного изучения. В случае подтверждения этих свойств и гипотез открываются интересные перспективы для получения изделий с новыми свойствами, особенно в сочетании с возможностью прямого легирования.

3. **Для машиностроительных заводов** возможным и целесообразным вариантом технологических схем является получение в агрегатах типа СЭР жидкого полупродукта или твердой шихтовой заготовки (модуль 3 на рис. 3) с последующей доработкой его в существующих на этих заводах дуговых или индукционных печах. Металлургическое производство на многих российских (и в странах СНГ) машиностроительных заводах находится в устаревшем виде. Предлагаемые разработки открывают возможность создания собственной мини-металлургии «полного цикла», т.е. без использования лома. При этом одновременно решаются задачи получения первородного металла без неокисляемых примесей (меди и никеля), а также использования пылевидных металлосодержащих отходов (окалины, шламов, мелкой стружки и др.).

4. **Комплексная, практически безотходная переработка титаномагнетитовых руд**, огромные запасы которых имеются на Урале, в Западной и Восточной Сибири, в то время как

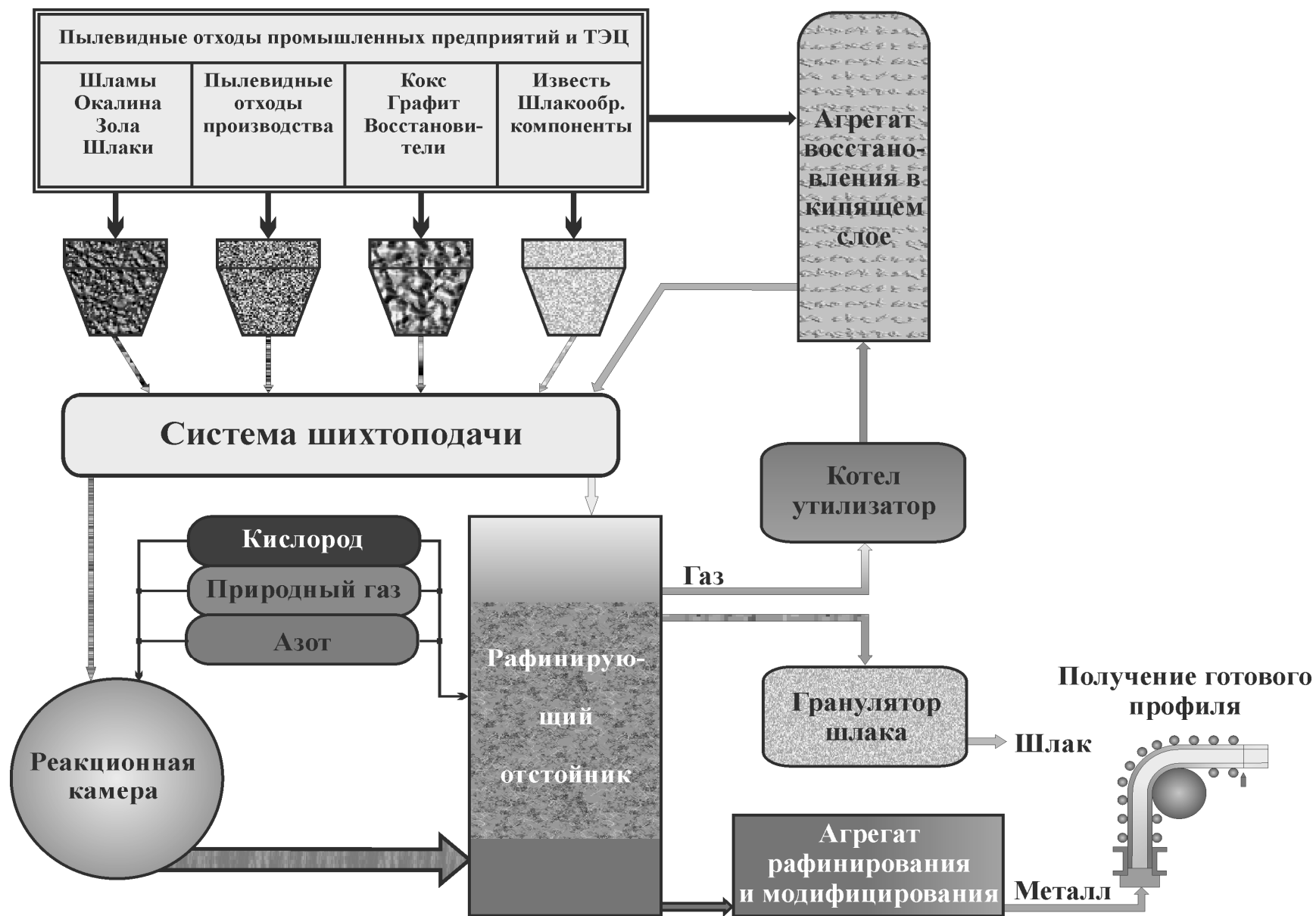


Рис 2. Технологическая схема модуля

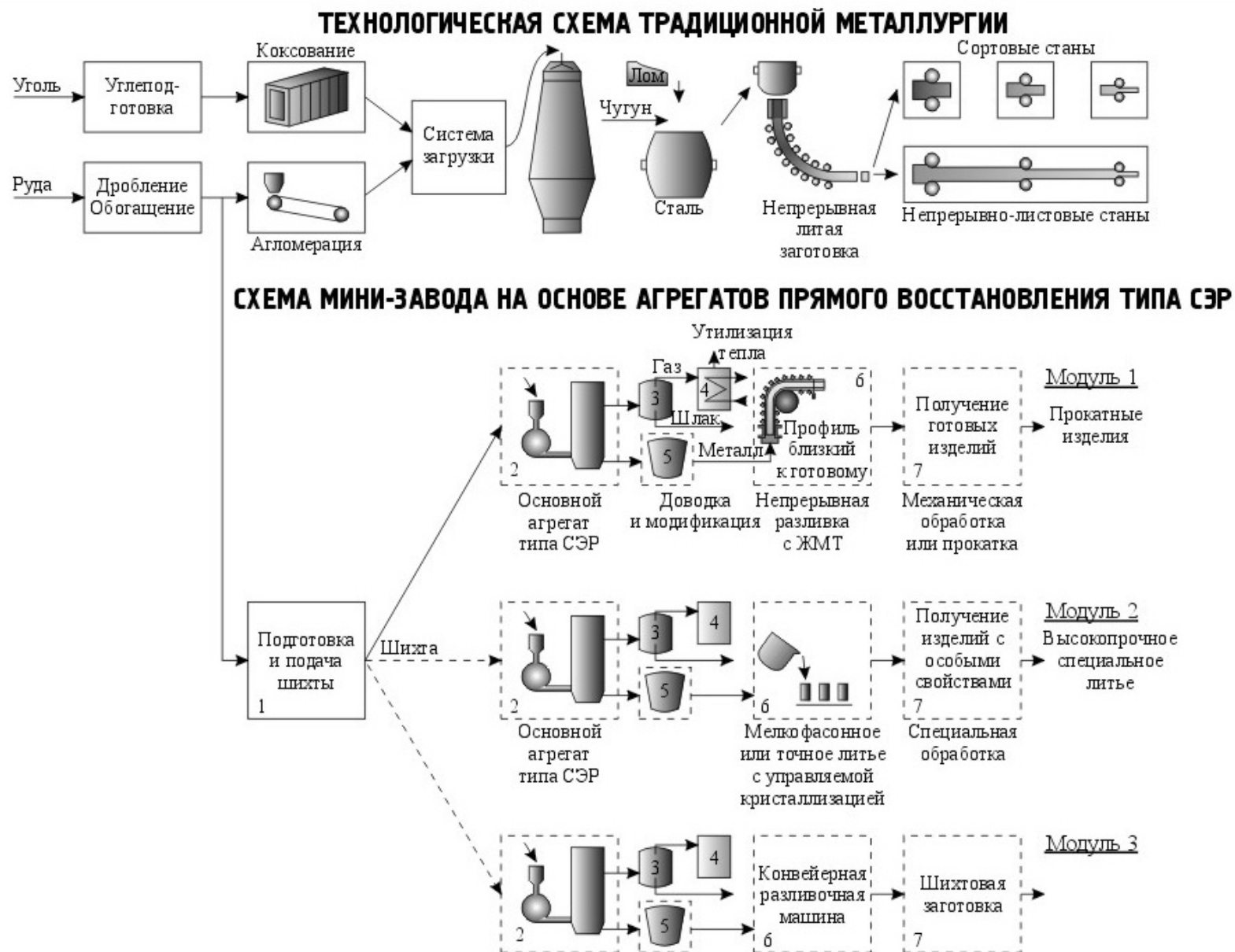


Рис 3. Сравнение технологий

половина сырья для титановой промышленности ввозится на Урал с Украины. В доменных печах пока осуществляется лишь подшихтовка такими рудами в ограниченных масштабах из-за опасности получения вязких гетерогенных шлаков.

На опытной установке в 2001 г. была показана принципиальная возможность реализации технологии переработки титаномагнетитового концентрата в агрегате типа СЭР с разделением железосодержащей и титаносодержащей составляющих [10]. Это достигается благодаря тому, что процесс в агрегате типа СЭР находится в газофазной области, а шлак взвешен в верхней части рафинирующего отстойника и может выпускаться с любого уровня по высоте агрегата с обеспечением оптимального (с точки зрения текучести шлака) содержания оксидов железа и титана. Эта весьма важная как для черной, так и для цветной металлургии задача заслуживает отдельного рассмотрения [11].

В связи с тем, что рассматриваемый агрегат обладает определенной степенью универсальности, в нем возможна реализация также ряда других технологий. В частности, по заданию руководства Руставского металлургического завода (Грузия) в 1996 г. нами была просчитана термодинамическая и энергетическая возможности автогенной переработки в этом агрегате медных сульфидных концентратов на штейн или даже на черновую медь. В связи с полной изоляцией процесса от атмосферы при этом получается высококонцентрированный сернистый газ с содержанием диоксида серы порядка 50 – 60 %. Это открывает возможности для эффективной переработки отходящих газов на серную кислоту, элементарную серу, другие продукты и обеспечения полной замкнутости процесса. Учитывая тот факт, что содержание оксидов железа в шлаке при производстве штейна и особенно черновой меди составляет порядка 40 – 45 %, этот шлак может также перерабатываться в агрегате типа СЭР и таким образом получается практически безотходное производство. По-видимому, в подобном агрегате также возможно конвертирование штейна на черновую медь. Естественно, для проверки возможности реализации этих технологий необходимо создание опытной установки.

Для ускорения реализации предлагаемой разработки необходимо:

1. Создание совместно с заводом «Сибэлектротерм» пилотного мини-модуля и отработка на нем новых технологий, а затем изготовление типового мини-модуля производительностью 30 тыс. т в год для литейных цехов машиностроительных заводов и типового модуля

производительностью 250 – 300 тыс. т. На основе этих модулей планируется создание металлургических мини-заводов опережающего научно-технического уровня с полным циклом производства – от руды (или пылевидных отходов) до готового металла, без использования дорогостоящего и дефицитного металлолома, с содержанием вредных примесей, ограничивающих возможность получения ряда марок стали.

2. Создание, например, в г. Новокузнецке проектно-инженерного центра и производственной базы для строительства и комплектации металлургических мини-заводов «под ключ» (в Новокузнецке имеются группы проектировщиков бывшего Сибгипромеца и других проектных институтов). Реализация этой программы может осуществляться поэтапно, не требует больших единичных инвестиций и отличается достаточно быстрой окупаемостью. Благодаря высокой наукоемкости агрегаты имеют небольшие размеры, что позволяет создавать даже мобильные энергометаллургические установки, не требующие подвода электрической энергии, что очень важно при освоении малообжитых районов. Возможен также вариант использования этих агрегатов как газификаторов угля путем его сжигания в шлаковом слое с получением энергетического или синтез-газа с одновременным получением металла (обогащенного легирующими и редкоземельными элементами) из золы.

Следует отметить, что изменение структуры металлургии может идти и по пути производства металлизированных окатышей или брикетов методом прямого восстановления с получением металла в электросталеплавильных печах. Такие технологические схемы в последние годы уже получили достаточное развитие. Однако строительство таких установок требует больших капитальных затрат и, кроме того, здесь реализуется традиционная для металлургии схема: дробление сырья – обогащение – окомкование – плавка, которая находится в противоречии с принципами глобальной экологии – минимизации энтропии. Следует также заметить, что процесс Корекс, в качестве важного преимущества которого на ранних этапах его развития выдвигалась возможность переработки относительно бедных и пылевидных руд, все больше утрачивает эти преимущества в связи с тенденцией увеличения объема агрегатов. Более эффективный путь – непосредственное получение металла из пылевидных материалов без окомкования, что резко уменьшает размеры агрегатов, капитальные и энергетические затраты.

Выводы. Описан струйно-эмульсионный металлургический процесс, отличающийся от процессов прямого твердофазного восстановления (Мидрекс, НуL-3), твердо- и жидкофазного процесса Корекс высокой скоростью протекания физико-химических процессов, малым удельным объемом агрегатов, небольшими энерго- и капиталозатратами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б л и з н ю к о в А.С. Изменения развития черной металлургии при использовании процессов Fastmelt и ITmk3 с применением угля // Новости черной металлургии за рубежом. 2009. № 5. С. 23 – 26.
2. Б л и з н ю к о в А.С. Прямое восстановление железной руды углем // Новости черной металлургии за рубежом. 2010. № 6. С. 20 – 25.
3. Ц ы м б а л В.П., М о ч а л о в С.П., К а л а ш н и к о в С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х частях. Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: Уч. пособие / Под ред. В.П. Цымбала. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2005. – 264 с.
4. Н и к о л и с Г., П р и г о ж и н И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
5. Х а к е н Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 406 с.
6. Ц ы м б а л В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии: Учебник для вузов. – М. – Кемерово: Издательское объединение «Российские университеты», 2006. – 430 с.
7. Н а к о р я к о в В.Е., П о к у с а е в Б.Г., Ш р е й б е р И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
8. Ц ы м б а л В.П., М о ч а л о в С.П. Создание новых металлургических процессов и принципов управления на основе синергетического подхода // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 2 – 5.
9. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными иннокуляторами / В.П. Сабуров, Е.Н. Еремин, А.Н. Черепанов, Г.Н. Миннеханов. – Омск: изд. ОмГТУ, 2002. – 212 с.
10. Патент 2272849 РФ. Способ получения металлов из рудных материалов и агрегат для его осуществления / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов. Заявлено 19.07.2004; опубл. 27.03.2006. // Бюллетень РСТ. № 9.
11. Ц ы м б а л В. П., М о ч а л о в С. П. В разделенных потоках. О новом способе и агрегате переработки природно-легированных руд и получения металлов // Металлы Евразии. 2006. № 6. С. 78 – 80.

© 2014 г. В.П. Цымбал, С.П. Мочалов,
А.А. Оленников, А.М. Огнев
Поступила 17 июня 2014 г.