



УДК 669.187.58

## ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛУРГИИ И ТЕХНОЛОГИИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.В. Цветков, А.В. Николаев, А.В. Самохин

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия).  
119991, Москва, Ленинский пр-т, 49. E-mail: tsvetkov@imet.ac.ru

Сформулирована аппаратурно-технологическая классификация плазменных процессов в металлургии и при обработке материалов, позволившая оценить перспективы их практического применения и пути оптимизации конструктивно-технологического оформления. Оборудование для шахтных печей с плазменным нагревом и процессы воздействия плазмы на металлургические расплавы имеют близкие прототипы в классической металлургии. Струйно-плазменные процессы, ориентированные на получение веществ в дисперсном состоянии, требуют создания оригинального оборудования. Авторами реализованы процессы плазменно-водородного восстановления оксидов тугоплавких металлов, плазменной восстановительной плавки оксидов группы железа, получения соединений металлов (карбиды, нитриды, оксиды и др.), позволяющие производить продукты в виде дисперсных порошков. Они отличаются возможностью энерго- и ресурсосбережения, получения продуктов с особыми эксплуатационными свойствами и совместимостью с окружающей средой. Предложена концепция модульного энерготехнологического комплекса, объединяющего на базе плазменной техники производство энергии и химико-металлургическое изготовление металлов, сталей и сплавов из природного и техногенного сырья. Такой экологически чистый комплекс позволит снизить энерго- и ресурсозатраты. Библиогр. 15, ил. 10.

**Ключевые слова:** струйно-плазменные процессы; дисперсные порошки; плазмохимическая установка; вольфрам; энерго- и ресурсосбережение; энерготехнологический комплекс; плазменно-дуговое жидкофазное восстановление железа

Исследования физикохимии и технологии воздействия термической плазмы на вещество в различных агрегатных состояниях, направленные на разработку экологически чистых энерго- и ресурсосберегающих процессов производства материалов с особыми свойствами, в том числе наноматериалов, основаны на научной теории о воздействии высококонцентрированных источников энергии на вещество [1, 2].

В результате систематических исследований термодинамики, кинетики и механизма восстановления оксидных систем с использованием современных методов исследования топохимических реакций, положений гетерогенного катализа, теории абсолютных скоростей реакций создана теория процессов восстановления металлов в различных агрегатных состояниях, в том числе при воздействии потоков термической плазмы [3, 4].

Разработана методология исследования плазменных процессов, основанная на высокотемпературном термодинамическом анализе, математическом моделировании и экспериментальных кинетических исследованиях, с использованием специально разработанной аппаратуры [5].

В ходе струйно-плазменных процессов выявлена определяющая роль тепломассообмена для распределенного в плазменном потоке диспергированного обрабатываемого вещества и его перехода в газовую фазу, т.е. степени гомогенизации процесса [3, 5–8].

Сформулирована аппаратурно-технологическая классификация плазменных процессов в металлургии и обработке материалов, позволившая оценить перспективы их практического применения, а также пути оптимизации конструктивно-технологического оформления [7] (рис. 1). Отечественные работы в области применения плазменной техники проводились в ряде организаций, но, к сожалению, не получили существенного развития. Однако использование электродуговых плазмотронов мегаваттной мощности способствует успешному применению плазмы в промышленных шахтных агрегатах (например, в плазменных вагранках в США) или в процессах плазменной переработки цинксодержащих пылей на заводе фирмы «SKF Steel» (Швеция).

Процессы воздействия плазмы на металлургические расплавы, конструктивно оформленные в



Рис. 1. Аппаратурно-технологическая классификация плазменных процессов в металлургии и при обработке материалов

виде плазменных печей, в ряде вариантов получили достаточно широкое применение в рафинирующем и легирующем переplавках, плазменном подогреве металла перед непрерывной разливкой. Отечественные разработки, реализованные на Челябинском металлургическом заводе, перенесены на завод во Фрайтале (бывшая ГДР), где успешно производили до 150 марок качественных сталей и сплавов. Впоследствии по лицензии завода использовались в Австрии (50-тонная плазменная печь фирмы «FEST-Alpine»). Нами разработан и внедрен на комбинате «Южуралникель» процесс плазменной восстановительной плавки оксидного сырья применительно к производству металлического кобальта (рис. 2, 3), впоследствии использованный для получения никеля.

Анализ процессов четвертого класса не является предметом рассмотрения настоящей статьи, однако следует отметить их распространение в промышленности, например процессов плазменной резки, плазменного напыления. Весьма перспективным является также плазменная обработка поверхности.

В отличие от процессов первых двух классов, у которых плазменное оборудование имеет аналогичные прототипы в классической металлургии, для процессов третьего класса (струйно-плазменных) требуется создание оригинального оборудования.

Как правило, струйно-плазменные процессы ориентированы на получение веществ в дисперсном состоянии. Плазменные процессы получения порошков отличаются универсальностью (рис. 4). При введении вещества в любом агрегатном состоя-

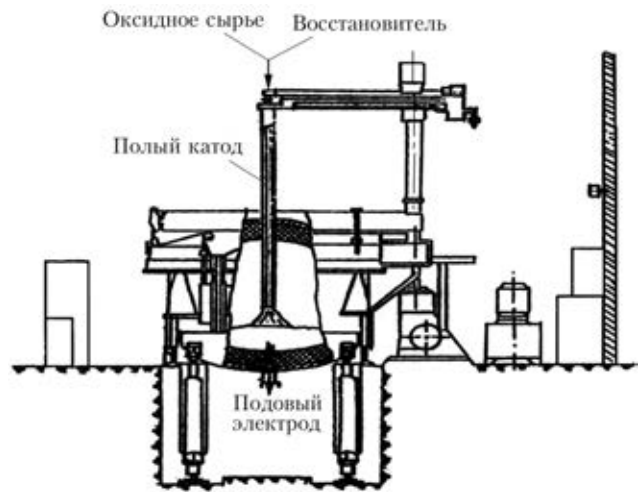


Рис. 2. Плазменная печь для восстановительной плавки оксидного сырья

нии в плазму, генерируемую различными источниками, которые отличаются химическим составом, мы с помощью физических и физико-химических процессов получаем сфероидизированные, плакированные порошки, а также порошки элементов и соединений различной дисперсности, в том числе наноразмерные.

Нами впервые в мировой практике реализован промышленный процесс плазменно-водородного восстановления оксида вольфрама с получением ультрадисперсного порошка вольфрама. На его основе созданы материалы с особыми эксплуатационными свойствами [9]. Продемонстрировано, что плазменные металлургические процессы, при условии рационального выбора объекта и оптимизации конструктивно-технологического оформления, являются энерго- и ресурсосберегающими в обеспечении совместимости с окружающей средой.

Для ультрадисперсных продуктов плазменного восстановления оксидов вольфрама продемонстрирован ряд практических применений, основанных на особенностях ультрадисперсного состояния (снижение температуры и энергоемкости компактирования, интенсификация процессов спекания и



Рис. 3. Промышленная плазменная печь восстановительной плавки оксидного сырья

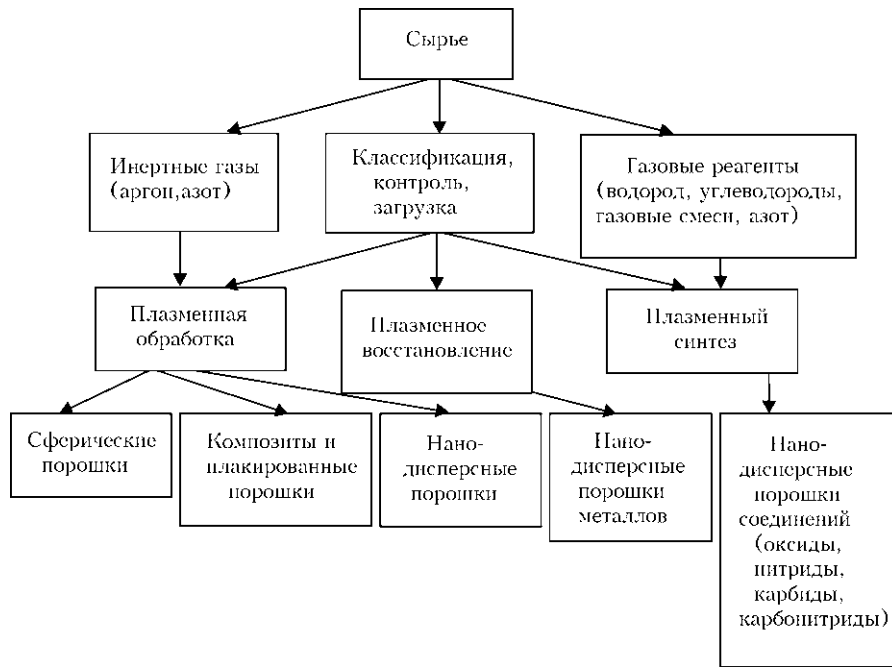


Рис. 4. Схема плазменной технологии производства порошков

сварки, получение на их основе твердых сплавов повышенной твердости и износостойкости).

Разработана и запатентована конструкция плазмохимической установки для получения нанопорошков металлов и химических соединений при взаимодействии дисперсного и парообразного сырья в струе термической плазмы, генерируемой электродуговым плазмотроном (рис. 5).

Исследован ряд плазмохимических процессов получения нанодисперсных порошков металлов и соединений. Установлены термодинамические и кинетические закономерности, а также управляющие параметры, обеспечивающие получение порошков заданного химического и дисперсного составов. Разработаны методы управления средним размером частиц получаемых порошков при изменении энтальпии плазменной струи, расхода сырья, конструктивных особенностей реактора, а также при использовании газовой закалки продуктов плазмохимического взаимодействия. В качестве преимуществ предлагаемой технологии продемонстрированы по-

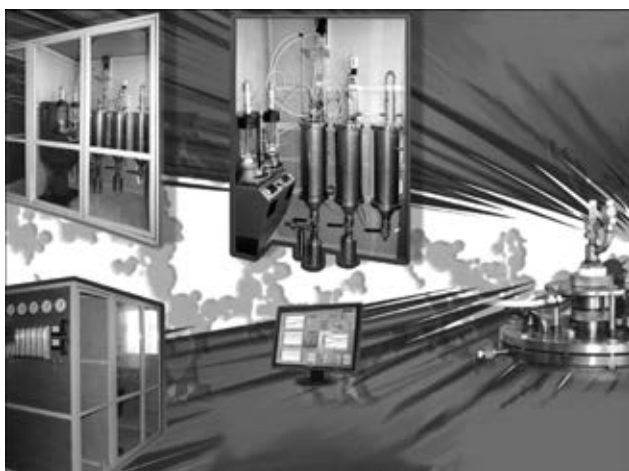


Рис. 5. Плазмохимическая установка синтеза нанопорошков

лучаемые нанопорошки (металлы, карбиды, нитриды, карбонитриды, оксиды и др.), небольшая продолжительность плазменных процессов ( $<0,01$  с) и высокая производительность оборудования, возможность использования традиционной сырьевой базы без предварительной подготовки, значительный диапазон производительности (0,1... $n \cdot 10$  кг/ч) [10–13].

Разработаны физико-химические основы и принципы конструктивно-технологического оформления процесса получения путем синтеза в углеводородсодержащей плазме нанопорошков системы вольфрам–углерод (рис. 6), используемых для получения нанопорошков монокарбида вольфрама в качестве основы для производства наноструктурных твердых сплавов со значительно повышенными эксплуатационными свойствами (рис. 7). Актуаль-

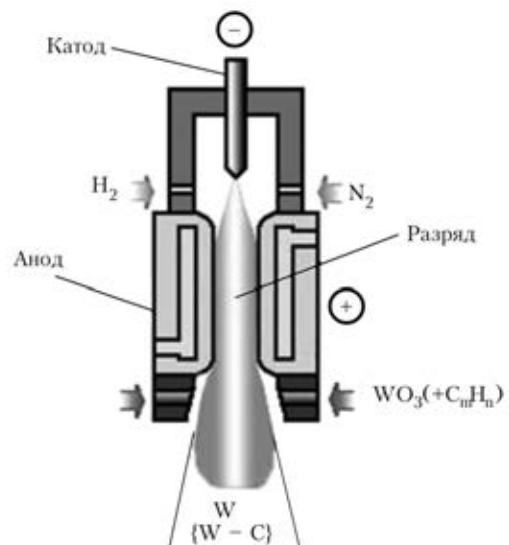


Рис. 6. Принципиальная схема получения нанопорошков вольфрама и {W-C} в струе термической плазмы дугового разряда

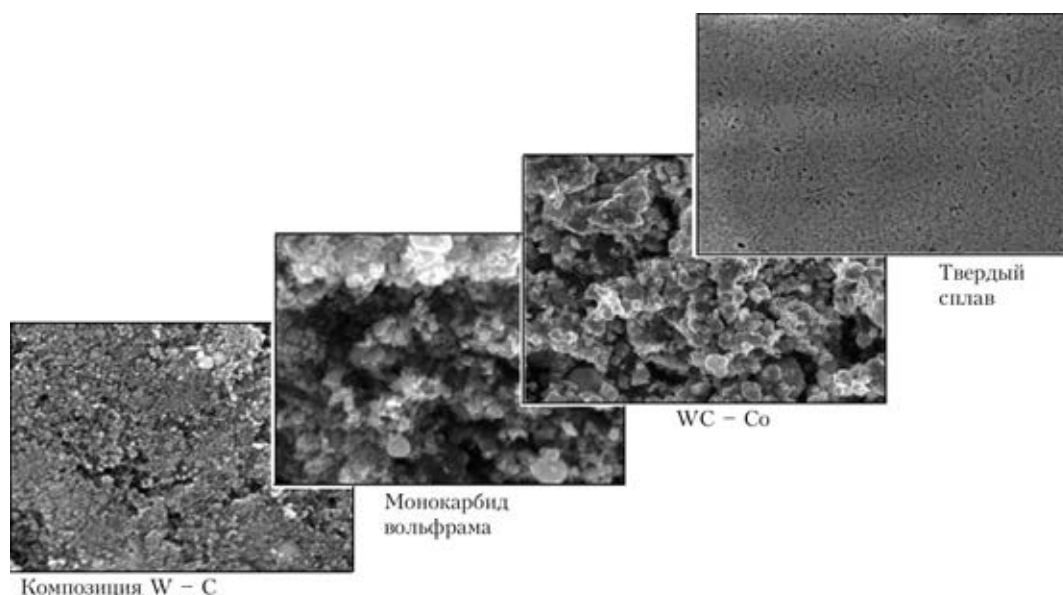


Рис. 7. Стадии получения наноструктурного твердого сплава

ность этой проблемы для отечественной порошковой металлургии определяется следующими факторами. В настоящее время российская промышленность потребляет около 3000 т твердых сплавов (примерно 10 % мирового потребления). Треть этого количества приобретают за рубежом, 1200 т/год производит КЗТС, 300 т — завод «Победит», 100 т — фирма «АЛГ», остальное — другие мелкие производители. Российские предприятия в настоящее время выплавляют только средне- и крупнозернистые (более 1 мкм) твердые сплавы. Задача повышения качества твердых сплавов во всем мире решается путем их наноструктурирования.

Рассмотрены и частично опробованы виды перспективного практического использования нанопорошков для создания материалов с особыми свойствами, например для модифицирования литейных сплавов, создания эффективных композитов и покрытий, в том числе наноструктурные мишени для нанесения покрытий, порошки для нанесения наноструктурных покрытий, компоненты для композиционных материалов, компоненты модификаторов литых сплавов, компоненты наноструктурных износостойких покрытий, нанопористые металлические и керамические фильтры.

В настоящее время наш коллектив предлагает к практической реализации следующие научно-технологические разработки [14, 15]:

технологические процессы получения наноразмерных порошков элементов (вольфрам, тантал, ниобий, молибден, никель, кобальт, железо, медь) и их соединений (оксидов, карбидов, нитридов), а также композиций с заданным дисперсным, химическим и фазовым составами в термической плазме дугового электрического разряда. Средний размер получаемых нанопорошков изменяется в диапазоне 20...100 нм;

основы технологии создания наноструктурных твердых сплавов карбид вольфрама-кобальт с резко повышенной твердостью и износостойкостью для

применения в изготовлении режущего инструмента. Предусмотрено получение твердых сплавов в диапазоне концентраций от ВК-1 до ВК-15 с введением комплексных ингибиторов роста зерна (рис. 7);

изготовление плазмохимических установок синтеза нанопорошков металлов и соединений мощностью 30, 100, 300 кВт (производительностью 0,5...1,0; 5...10; 30...50 кг/ч) с использованием электродуговых генераторов плазмы;

проектирование производственных участков нанопорошков на базе плазмохимических установок;

исследования, направленные на разработку материалов для создания высокоемких электролитических конденсаторов на основе нанопорошков тантала и ниобия, нанопорошковых модификаторов чугуна, стали и сплавов, обеспечивающих уменьшение размеров кристаллической структуры металла при массовой доле 0,05...0,1 %;

композиционных материалов с использованием нанопорошков;

нанопорошковых пигментов;

наноструктурных покрытий способом плазменного напыления материалов, приготовленных с использованием нанопорошков;

наноструктурных металлических и композиционных проводников с особыми электромагнитными свойствами;

катализаторов топливных элементов.

Для обеспечения безопасной работы с наноструктурными объектами исследовали токсикологические свойства нанопорошковых материалов. Оценивали риск и возможность обеспечения безопасности производства, использования и утилизации наноматериалов. Создали базу данных по биобезопасности существующих наноматериалов. Разработали методологические подходы к гигиеническому нормированию и сертификации производств, товаров и услуг в сфере нанотехнологии.

Изучены некоторые процессы при воздействии термической плазмы на газовые среды, расплавы и

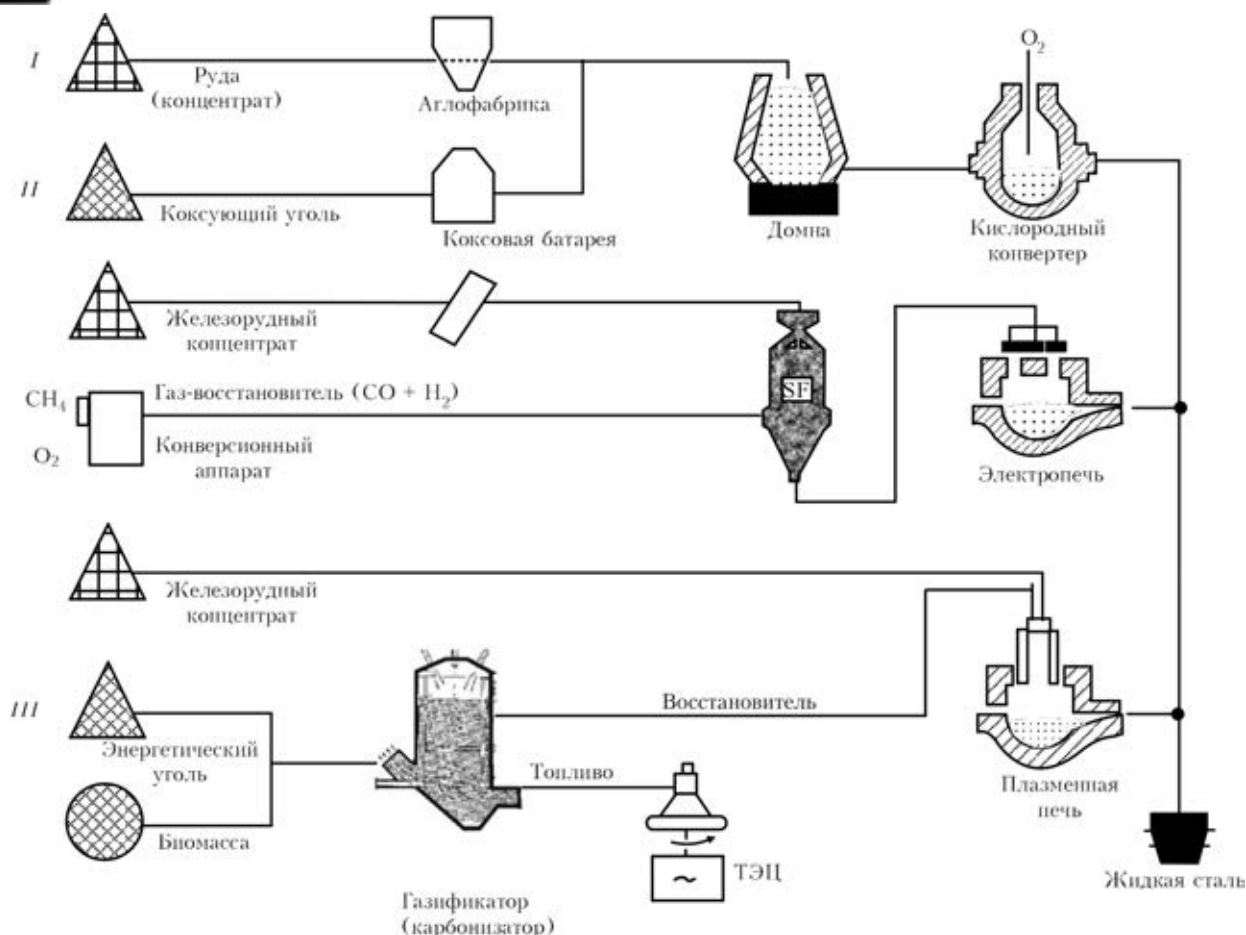


Рис. 8. Схемы (I–III) производства стали

растворы, в том числе применительно к процессам переработки техногенного сырья, среди которых плазменно-каталитический риформинг углеводородного сырья для получения водородсодержащих газов и окисление органических примесей в воде.

Современное производство стали, осуществляемое по аппаратурно-технологической схеме доменно-конвертер (рис. 8) имеет ряд существенных недостатков, определяемых необходимостью соответствия высоким требованиям к сырью и его специальной подготовке, поскольку специфика доменного процесса требует от поступающего в домы материала высокого уровня механических свойств в сочетании с обеспечением газопроницаемости. Агломерация и коксохимическое производство, где применяют дорогой и дефицитный коксующийся уголь, не только удорожают производство в целом, но и наносят существенный ущерб окружающей среде, который по ценностной оценке может достигать 25 % себестоимости производства стали. Предлагаемые альтернативные процессы, в частности способ прямого восстановления, нашедший промышленное применение и в отечественной металлургии, по ряду причин, в том числе из-за значительных энергетических расходов, не смог существенно потеснить традиционную технологию производства стали, в основе которой лежит доменный процесс. Представляется, что положительную роль в возможной трансформации сталеплавильного производства мо-

жет сыграть применение плазменной техники как на стадии получения восстановителя и топлива для экологически чистой ТЭЦ из низкосортного органического сырья путем его газификации, так и в восстановительном агрегате.

Нами развивается концепция энерготехнологии будущего, основанная на создании по модульному принципу экологически чистого энерготехнологического комплекса, объединяющего на базе плазменной техники производство энергии и химико-металлургическое производство металлов, сплавов и соединений из природного и техногенного сырья (рис. 9). При этом прогнозируется значительное сокращение энергозатрат, по сравнению с традиционными и альтернативными способами.

Создание плазменного энергометаллургического комплекса позволит снизить в 1,5...2,0 раза энергоёмкость производства стали; в качестве первичного источника энергии использовать энергетический уголь и углеводородсодержащие отходы; снизить вредное воздействие на окружающую среду вследствие отсутствия коксохимического и агломерационного производств; расширить сырьевую базу, комплексно использовать рудное сырьё, создать многотоварное металлургическое производство, в том числе наноструктурных материалов; создать замкнутую экосистему комплекс-жилой массив.

Применительно к целевой задаче оптимизации конструктивно-технологического оформления вос-

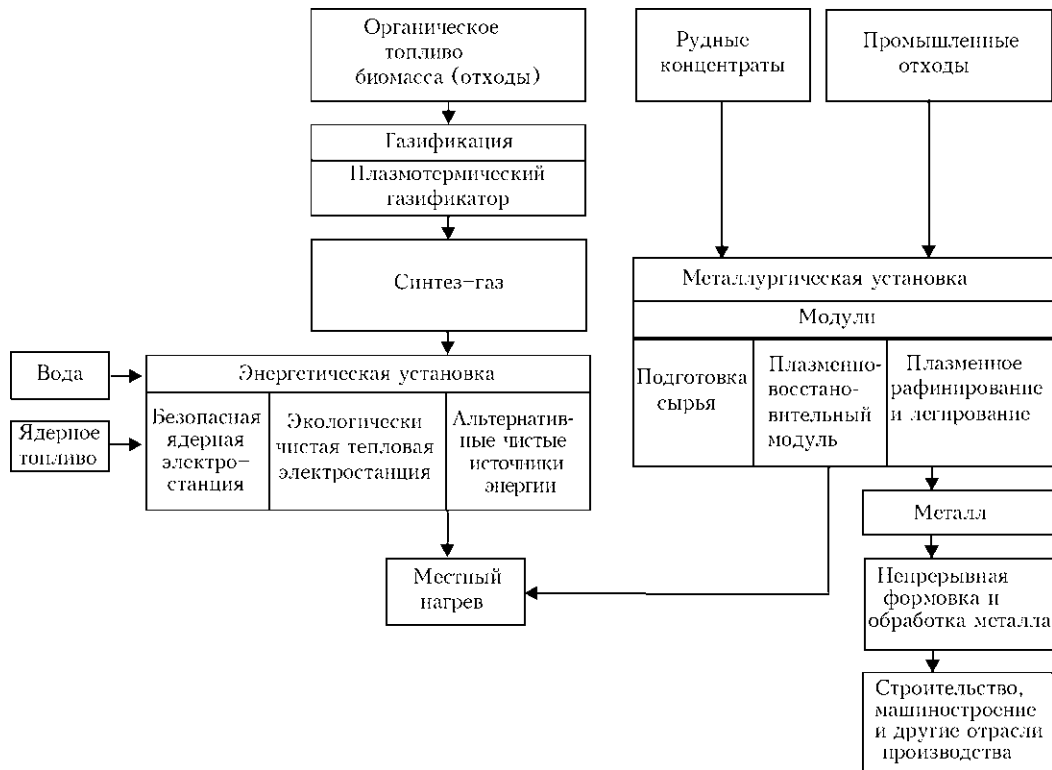


Рис. 9. Принципиальная схема энергометаллургического комплекса

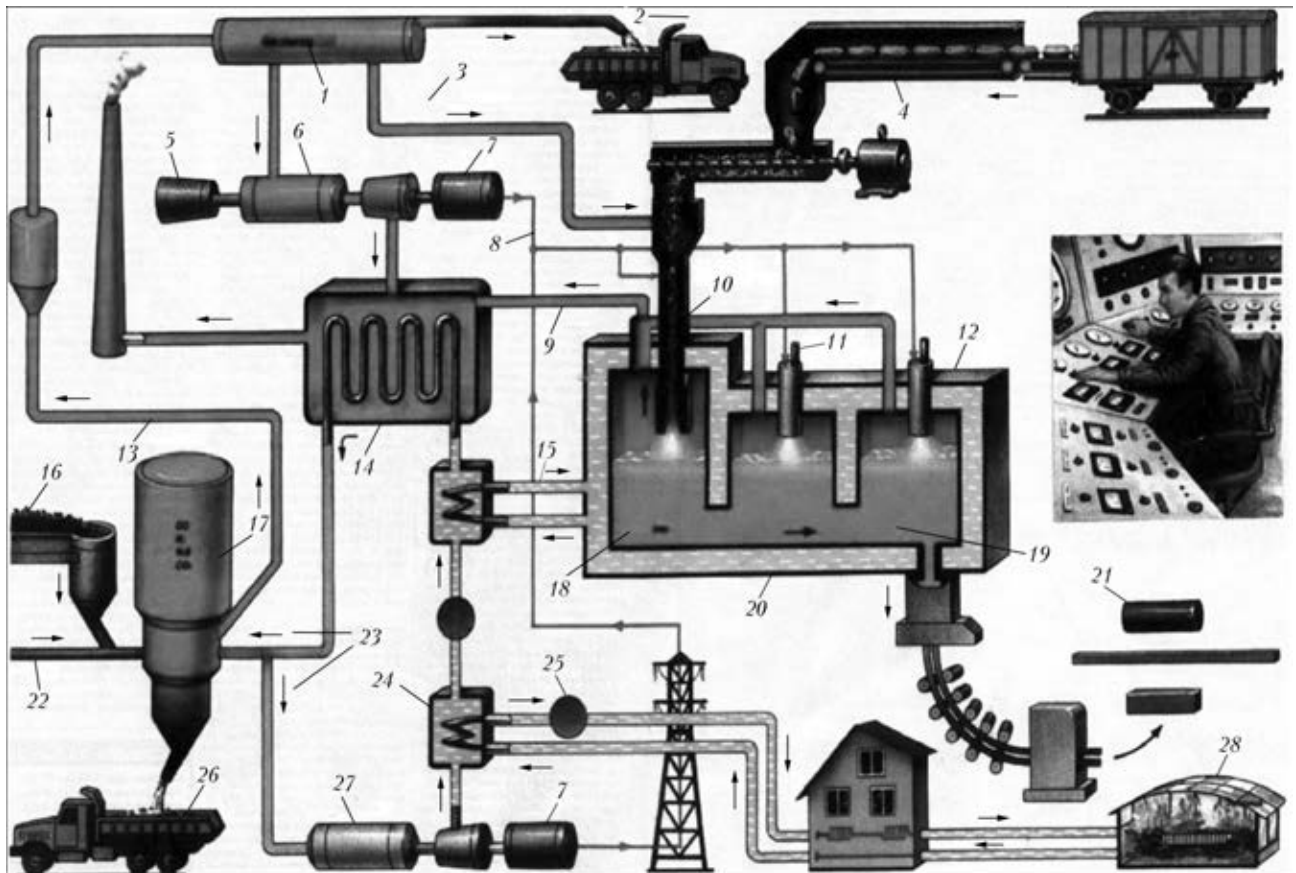


Рис. 10. Схема прогнозируемой металлургии будущего: 1 – газоочистка; 2 – сера; 3 – восстановительный газ; 4 – железорудный концентрат; 5 – компрессор; 6 – газовая турбина; 7 – генератор; 8 – подача электроэнергии; 9 – отработанный газ; 10 – плазмотрон (восстановление); 11 – плазмотрон (очистка); 12 – плазмотрон (легирование); 13 – газификатор; 14 – бойлер; 15 – вода; 16 – уголь; 17 –  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ; 18 – железо; 19 – сталь; 20 – металлургический блок; 21 – прокат; 22 – кислород; 23 – пар; 22 – теплообменник; 25 – насос; 26 – зола; 27 – паровая турбина; 28 – теплица



становительного модуля комплекса разработаны физико-химические и энергофизические основы построения процессов бескоксового плазменно-дугового получения металлов группы железа из дисперсного оксидного сырья. Продемонстрирована применимость процесса плазменного жидкофазного восстановления к сложному рудному сырью типа титаномагнетита. Выработаны рекомендации для составления технического задания на разработку и изготовление опытно-промышленной плазменно-дуговой жидкофазной печи мощностью 3...5 МВт для восстановления железа из титаномагнетитового концентрата.

На основе развиваемой концепции расчетных и экспериментальных исследований, нацеленных на создание оптимального конструктивного оформления энерготехнологических процессов на базе плазменной техники, надеемся предложить для реализации перспективную схему металлургии будущего (рис. 10).

*Работы проводились при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 11-08-00516-а, № 13-03-00733, грант Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-854.2012.3).*

1. Рыкалин Н.Н. Тепловые основы сварки. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — 271 с.
2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
3. Цветков Ю.В., Панфилов С.А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. — М.: Наука, 1980. — 360 с.

4. Цветков Ю.В. Пути интенсификации процессов восстановления в свете адсорбционно каталитических представлений. Физическая химия окислов металлов. — М.: Наука, 1981. — С. 9–15.
5. Цветков Ю.В. Особенности термодинамики и кинетики плазменно-металлургических процессов // Физика и химия плазменных металлургических процессов. — М.: Наука, 1985. — С. 9–15.
6. Tsvetkov Yu.V. Plasma metallurgy. Current state, problems and prospects // Pure and Applied Chemistry. — 1999. — 71, № 10. — P. 1853–1862.
7. Цветков Ю.В., Николаев А.В., Панфилов С.А. Плазменная металлургия. — Новосибирск: Наука, 1992. — 265 с.
8. Цветков Ю.В. Физикохимия плазменной металлургии // Технология металлов. — 2006. — № 4. — С. 7–14.
9. Каламазов Р.У., Цветков Ю.В. Высокодисперсные порошки вольфрама и молибдена. — М.: Металлургия, 1988. — 193 с.
10. Цветков Ю.В. Термическая плазма в нанотехнологиях // Наука в России. — 2006. — № 2. — С. 4–9.
11. Самохин А.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов // Химия высоких энергий. — 2006. — 40, № 2. — С. 120–126.
12. Цветков Ю.В., Самохин А.В. Плазменная нанопорошковая металлургия // Автомат. сварка. — 2008. — Ноябрь. — С. 171–175.
13. Теплоперенос в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением в процессах получения нанопорошков / А.Г. Астахов, А.В. Самохин, Ю.В. Цветков, Н.В. Алексеев // Химия высоких энергий. — 2012. — 46, № 4. — С. 327–330.
14. Цветков Ю.В., Николаев А.В. Плазменные процессы в составе энерготехнологического комплекса (некоторые проблемы металлургии будущего) // Ресурсы. Технология. Экономика. — 2006. — № 2. — С. 20–26; №3. — С. 38–42.
15. Энергоэффективное применение плазменной печи при восстановлении титаномагнетитового концентрата / А.В. Николаев, Д.Е. Кирпичёв, А.А. Николаев, Ю.В. Цветков // Главный энергетик. — 2012. — № 3. — С. 26–36.

Equipment-technology classification of plasma processes in metallurgy and in material processing has been established that allowed evaluation of the prospects for their practical application and means of optimization of design-technological characteristics. Equipment for shaft furnaces with plasma heating and processes of plasma action on metallurgical melts have close prototypes in classical metallurgy. Plasma-jet processes oriented to production of materials in the dispersed state, require development of original equipment. The authors have implemented processes of plasma-hydrogen reduction of refractory metal oxides, plasma reducing smelting of iron group oxides, producing metal compounds (carbides, nitrides, oxides, etc.), allowing manufacturing products in the form of dispersed powders. They feature the capability of energy and resource saving, making products with special service properties and environmental compatibility. A concept of modular energy technological complex is proposed, which combines generation of energy and chemico-metallurgical production of metals, steels and alloys from natural and technogenic raw materials on plasma technology base. Such a non-polluting complex will allow lowering energy and resource consumption. Ref. 15, Figures 10.

**Keywords:** plasma-jet processes; dispersed powders; plasma-chemical installation; tungsten; energy and resource saving; energy technological complex; plasma-arc liquid-phase reduction of iron

Поступила 11.07.2013

## МЕТАЛЛУРГИЯ. ЛИТМАШ; ТРУБЫ. РОССИЯ; АЛЮМИНИЙ/ЦВЕТМЕТ

июнь 2014 г., Москва

В июне 2014 г. состоятся Международные промышленные выставки по металлургии, оборудованию, технологиям и продукции «Металлургия. Литмаш-2014»; трубам «Трубы. Россия-2014» и цветным металлам «Алюминий/Цветмет-2014».

<http://www.metalinfo.ru/ru/news>  
Источник: ИИС «Металлоснабжение и сбыт»