

УДК [669.11+669.295-043.96](477.42)
DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-17-24](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-17-24)

Д.Ю. Бабошко
С.Н. Зима, к. геол.-мин. н.
Г.В. Губин, д.т.н., проф.
Л.Н. Сайтгареев, к.т.н., доц.
О.С. Воденникова, к.т.н., доц.
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»
Запорожская государственная инженерная академия

Исследование механизма твердофазного восстановления титаномагнетитового концентрата Крапивенского месторождения

В работе освещены результаты исследований по твердофазному восстановлению титаномагнетитового концентрата Крапивенского месторождения, характеризующегося высоким (до 25 %) TiO_2 и сложным строением рудных зерен – на уровне распада твёрдого раствора. Выводы и положения минераграфических исследований проверялись изучением химического состава остаточных зерен титаномагнетита, а также фаз шлака и металла на разных этапах восстановления. Всего на лазерном микроанализаторе было выполнено около 200 анализов на содержание 12 элементов. Ниже нами излагается наше видение процесса твердофазного восстановления титаномагнетитового концентрата, и даются рекомендации по рациональной крупности концентрата и разработке технологических режимов его восстановления.

Ключевые слова: карботермическое восстановление исследования под микроскопом; остаточные рудные зерна; титаномагнетит; структура; температура; время выдержки материалов; механизм процесса.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами. По информации отдела Геологии полезных ископаемых института геологических наук НАНУ, разведанные запасы титановых руд Украины находятся в пределах 7-12% от мировых. К сырьевому потенциалу страны помимо основных ильменит-рутиловых руд входят также комплексные апатит-ильменит-титаномагнетитовые руды. Разработанные технологии обогащения комплексных руд дают возможность получить титаномагнетитовый концентрат с массовой долей до 25 % TiO_2 [1,2], который при разработке соответствующей технологии переработки сможет послужить дополнительным источником для получения титанового шлака и железа. Следует отметить, что украинские титаномагнетиты имеют сложное минералогическое строение, поэтому изначально нужно провести подробное изучение влияния температурно-временных параметров для разработки соответствующей металлургической технологии переработки.

Анализ последних исследований и публикаций. Известно, что в ИМЕТ им. А.А. Байкова было проведено ряд экспериментальных исследований по карботермическому восстановлению, в которых использовались титаномагнетитовые концентраты с массовой долей $Fe_{общ.}$ 56,5-64,5 % и TiO_2 до 16,7% [3, 4]. Результаты показывают, что при восстановлении получены шлаки с широким спектром химического состава (15,4-62,5 % TiO_2) и это является важным фактором для изучения и выявления механизма формирования железосодержащих и титаносодержащих фаз и распределения элементов, в частности, железа, ванадия и титана, между фазами в них. Для титаномагнетитовых концентратов с массовой долей оксида титана до 25 % исследования не проводились.

Постановка задачи. Изучить механизм структурных образований железосодержащей и шлаковой фазы из титаномагнетитового концентрата Крапивенского месторождения при твердофазном карботермическом восстановлении и влияния на процесс температурно-временных параметров.

Изложение основного материала. Ведущую роль в течении процесса восстановления, безусловно, играет температура, но время выдержки также имеет немаловажное значение. Необходимо отметить, что для оценки процесса восстановления иногда будет использоваться и термин «интенсивность восстановления», без уточнения каким из параметров (температура – время выдержки) она обусловлена.

Минераграфическими исследованиями серий окатышей, восстановленных в указанном диапазоне температур и времени выдержки [5,6], было установлено, что заметное восстановление титаномагнетитового концентрата начинается при температуре около 900 °С, выдержках 10-20 мин и определяется размером зерен: восстанавливаются сначала самые мелкие (менее 40-50 мкм); крупные (до 0,60-0,70 мм) – могут сохраняться до самых высоких температур. Отмечено, что чем выше степень восстановления концентрата, тем меньше в нем количество остаточных зерен титаномагнетита и тем они крупнее.

Исследованиями под микроскопом было отмечено, что при восстановлении зерна титаномагнетита меняют свой цвет (до серого) и отражательную способность (понижается). Чем выше интенсивность процесса, тем ближе эти характеристики к рутиловым. Было высказано предположение, что при восстановлении железо уходит из кристаллической решетки минерала и мигрирует за пределы рудных зерен. И, действительно, уже при температуре 1000-1100 °С (выдержке, соответственно, 40 и 10 мин) в

контурах изменивших цвет рудных зерен размером до 50 мкм или вблизи их поверхности, наблюдалась мелкая вкрапленность металлического железа (Fe^0), а за пределами рудных зерен началось формирование железной губки (рис. 1-а).

Изменение структурно-морфологических и оптических характеристик титаномагнетита при восстановлении было детально прослежено на сравнительно крупных (до 0,5-0,8 мм) остаточных зерен концентрата. Сначала с их поверхности, по контуру, появляются каймы серого цвета (рис.1-б). Затем зерна приобретают блоковое строение, подчеркнутое изменением оптических характеристик (рис.1-в). Блоки разобщаются (рис.1-г, д), а в некоторых случаях уменьшаются в размере, но пустоты по контуру – это, по нашему мнению, рыхлые массы тонкозернистого шлака, выкрашенные при изготовлении шлифа (рис.1-г,д; 2-г).

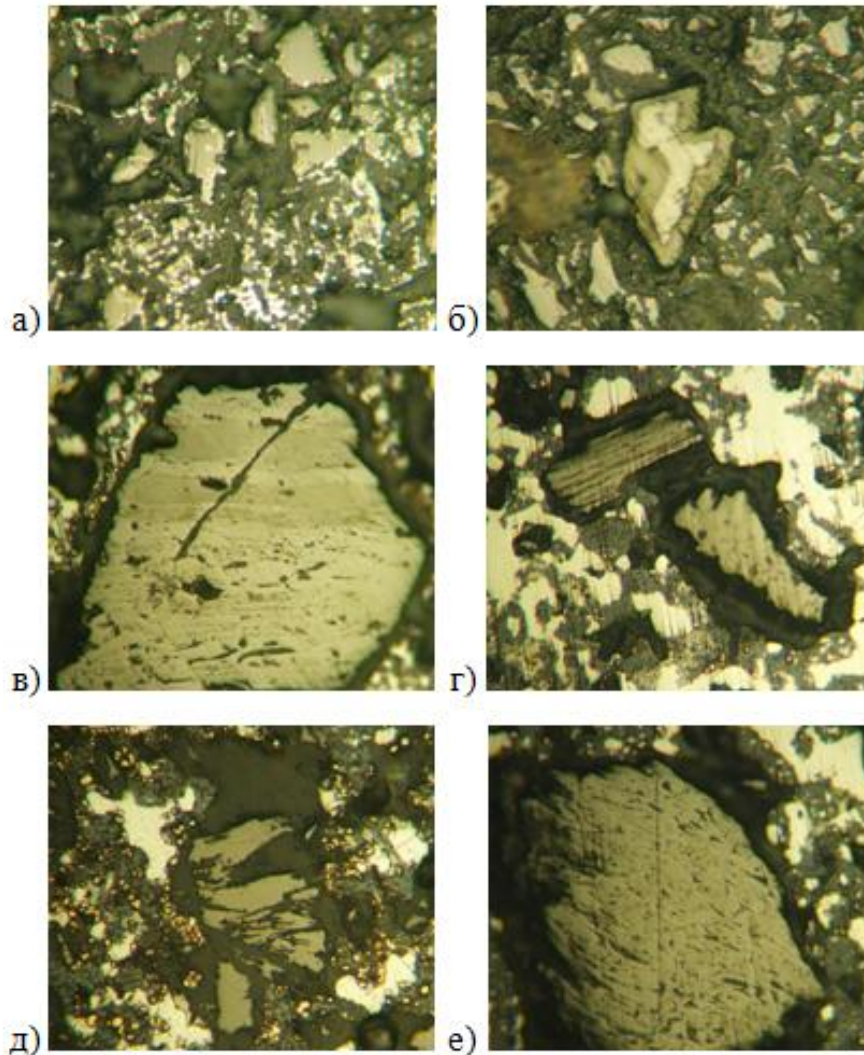


Рис. 1. Стадии изменения титаномагнетита в процессе восстановления

Отраженный свет, без анализатора. Ув. 200^x. Белое – железо металлическое; различные оттенки кремowego и светло-серое – титаномагнетит; темно-серое – фазы шлака; оранжевое(д) – выделение «оранжевых» зёрен.

а) начало изменения зерен титаномагнетита с развитием в них тонкой вкрапленности Fe^0 ; Т – 1100 °С, t – 10 мин;

б) кайма по контуру зерна титаномагнетита с более низким содержанием железа; Т – 1100 °С, t – 10 мин;

в) блоковая структура рудного зерна, обусловленное разной степенью изменения его состава; Т – 1250 °С, t – 40 мин;

г) различная степень изменения состава и структуры двух зерен титаномагнетита в окружении металлической губки и шлака; Т – 1300 °С, t – 40 мин;

д) разделение интенсивно измененного зерна титаномагнетита на разобщенные блоки; нагрев от 800 до 1300 °С, выдержка при 1300 °С 40 мин;

е) перекристаллизация измененного зерна титаномагнетита; Т – 1300 °С, t – 40 мин;

При высокой интенсивности процесса остаточные рудные зерна вообще могут быть перекристаллизованы с образованием призматических или тонкоигольчатых рутилоподобных агрегатов (рис. 1-е).

Эти изменения происходят в твердой фазе и следуют друг за другом именно в указанной последовательности, сменяя предыдущие с увеличением интенсивности восстановления, если величина зерна к тому времени ещё позволяет ему сохраниться. Самые крупные (до 0,7-0,8 мм) остаточные зерна при кратковременном (5 мин) воздействии сохранились даже при температуре восстановления 1500 °С. Они были заключены в рутиловом шлаке, отделяясь от него «рубашкой» из металлического железа (рис. 2-е).

На примере небольших (до 0,7-0,10 мм) идиоморфных зерен нам удалось наблюдать подробности восстановления (температура 1100 и 1250 °С, выдержка 40 и 5 мин) такого сложного по структуре и составу образования, как титаномагнетит Крапивенского месторождения [7,8]. В зернах с тонкорешетчатыми структурами распада сначала восстанавливается магнетитовая матрица – с образованием Fe^0 и миграцией его в межзерновое пространство. В контурах рудного зерна при этом сохраняется ильменитовая решетка (рис. 2-а). Она ещё некоторое время будет оставаться на месте, изменяясь структурно по составу и закладывая основу будущего титанового шлака (рис. 2-б), требующего для формирования более высокой интенсивности процесса, главным образом, температуры.

Проведенные нами исследования состава остаточных рудных зерен с использованием лазерного микроанализатора, установили, что с увеличением интенсивности восстановления содержание железа в титаномагнетите уменьшается, а титана – увеличивается. Процесс этот постепенный и длится он почти до температуры плавления ильменитовой составляющей. При этом состав новообразований, определяемый природой титаномагнетита и температурно-временными параметрами восстановления, постоянно обновляется. Поэтому те фазы которые фиксируются некоторыми исследователями [3], представляют собой только частный случай – ступеньку на незавершенном пути восстановления титаномагнетита.

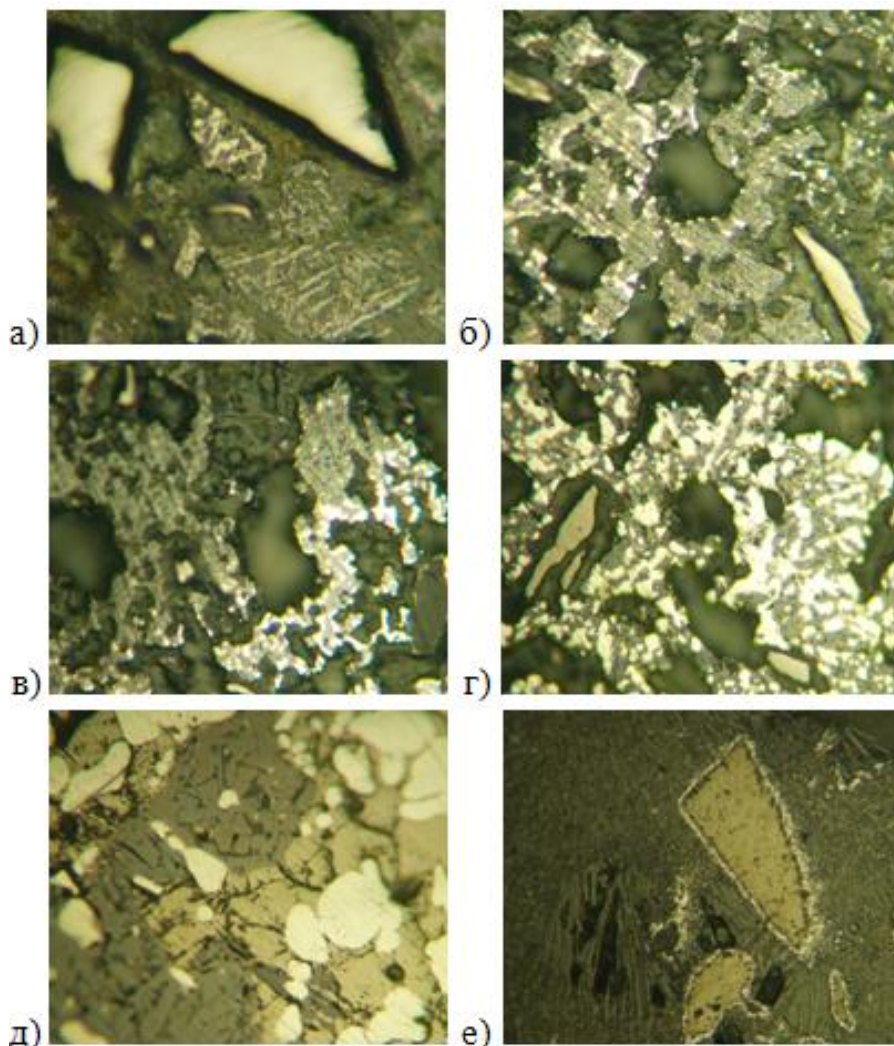


Рис. 2. Формирование шлаковых фаз

Отраженный свет, без анализатора. Ув. 200^x. Белое и красновато-коричневое (д)– металл; различные оттенки кремневого – титаномагнетит; оттенки серого – ильменит (а) и шлак; черное – поры.

- а) решетка ильменита в контурах зерна титаномагнетита; T – 1100 °C, t – 40 мин;
- б) начало формирования участков шлака; T – 1100 °C, t – 40 мин;
- в) разобшение участков шлака и губки Fe^o; T – 1200 °C, t – 20 мин;
- г) укрупнение губки Fe^o; T – 1100 °C, t – 40 мин;
- д) раскристаллизация крупных выделений шлака; T – 1350 °C, t – 50 мин;
- е) остаточное рудное зерно в рутиловом шлаке; T – 1500 °C, t – 5 мин.

Железо, удаляющееся из кристаллической решетки титаномагнетита, довольно свободно мигрирует в окатышах на небольшие расстояния, расплав его как бы «стекает» и концентрируется в отдельных участках (рис. 2-в), формируя пятнистые структуры. Уже при температуре 1200 °C и выдержке 20 мин на срезе окатышей наблюдаются хорошо видимые невооруженным глазом пятна – блестящие, сложенные металлической губкой, и матовые – шлаковые.

При дальнейшем увеличении интенсивности восстановления (температура 1300 °C и выше, выдержки до 40 мин) выделения Fe^o укрупняются, сливаются и образуют крупную губку в гнездах размером до десятых долей миллиметров (рис. 2-г).

Увеличение выдержки до 50-80 мин при температуре восстановления 1300 °C привело к локальному появлению расплава и размягчению окатышей, что нередко сопровождалось их деформацией. В этих условиях жидкий металл, стремясь вытечь из окатышей, формировал на их поверхности (в нижней части) шаровидные обособления диаметром до 2-4 мм. Структура окатышей при этом по-прежнему определялась, в основном, металлическими образованиями – крупная губка (до 1,5-2,5 мм) в срастании с микрообъемами титанового шлака, несколько увеличившимся в размере, по сравнению с более низкими параметрами восстановления (рис.2-д). Присутствие жидкой фазы способствовало формированию в шлаке более крупных, чем ранее, индивидов рутилоподобного облика (рис. 2-д). При этом округлые выделения металла на контакте со шлаком приобретали красновато-коричневый оттенок в цвете (рис.2-д), что, по данным определений на лазерном микроанализаторе, объясняется повышением в них (до 11%) содержания титана.

Подводя итог большому количеству исследований по восстановлению титаномагнетита при температуре 1300 °C, мы вынуждены констатировать факт, что даже при максимальных выдержках (50-80 мин) не наблюдалось ни качественного разобшения фаз металла и титанового шлака, ни концентрации их в объемах, необходимых для последующего механического разделения. Зато, металл начал активно усваивать титан, заимствуя его из шлака. По нашему мнению, при температуре восстановления 1300 °C нерационально использовать выдержки выше 40 мин. более действенным является дальнейшее наращивание температуры – вплоть до температуры плавления ильменитовой составляющей. Время выдержки с увеличением температуры восстановления необходимо, наоборот, сокращать.

Повышение температуры восстановления до 1500 °C и выдержка 5 мин способствовала скоплению металлической фазы в деформированное шаровидное образование с массовой долей Fe – 90-93,4 % и Ti – 2,5-0,2 %, а тонкозернистые массы рутилового шлака состояли из 95,5 % TiO₂, в которой присутствует незначительное количество Fe – до 1,84 (рис. 2-е).

Остановимся более подробно на эволюции химического состава фаз металла в процессе карботермического восстановления титаномагнетитового концентрата, для чего будут использованы замеры содержания элементов на лазерном микроанализаторе.

Прежде всего, что металл наиболее распространенный во всех восстановленных окатышах, независимо от режима их восстановления, мы назвали «белым» – из-за окраски под микроскопом, что бы отличить его от других металлических фаз, характеризующихся различными оттенками в цвете. Основными компонентами в химическом составе белого металла являлось железо и титан, содержание которых определялось уровнем процесса восстановления. Так, на начальных его этапах (температуры 1100-1300 °C и выдержки, соответственно, 40 – от 5 до 40 мин) белый металл характеризовался сравнительно низкими содержаниями железа (27-50 %) и высокими (22-8 %)–титана, т.е. по сути, представлял собой сплав этих элементов. Увеличение интенсивности восстановления (температуры 1300 и 1500 °C, выдержки 50-80 и 5 мин, соответственно, а также применение более сложных, многоступенчатых режимов) способствовало повышению до 67 % содержания железа в металле и снижению до 1-0,2 % в нем титана. Массовая доля других, менее значимых элементов (ванадия, магния, марганца пр.) также уменьшалась, т.е. упрощая химический состав, белый металл как бы стремился к «чистоте». Однако необходимо отметить, что при выдержки 40 мин (температура 1300 °C) в белом металле появились участки так называемого «грязного металла» с трудноразличимыми включениями на микроуровне (рис. 3-а). При более интенсивном восстановлении (выдержки 50-80 мин) в белом металле уже наблюдались сравнительно крупные (до 0,05-0,07 мм) включения округлой, вытянутой или неправильной формы, отличающиеся от белого металла различными оттенками в цвете.

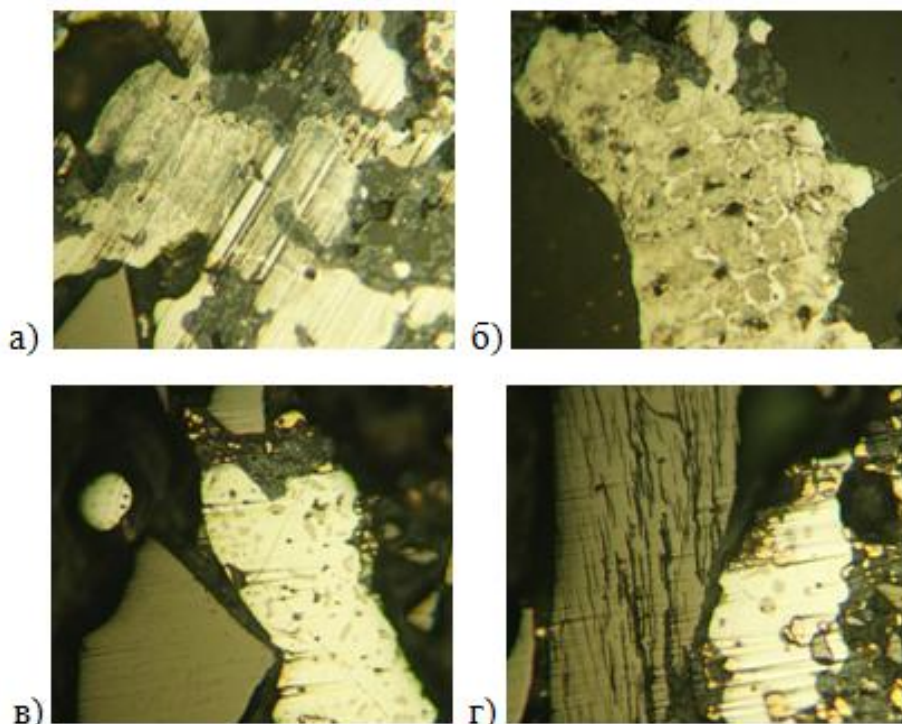


Рис. 3. Выделения металла

Отраженный свет, без анализатора. Ув. $200\times$. Белое, а также красновато-коричневое (б) и розовое (в) – металл; оранжевое – выделение «оранжевых» зёрен (г); различные оттенки серого – остаточные зерна титаномагнетита; темно-серое – шлак; черное – поры.

а) «грязный» металл (с включениями на микроуровне) с кристаллами белого металла; $T - 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t - 40$ мин;

б) красновато-коричневый металл с плёнками белого по поверхности гранул; $T - 800-1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t - 80$ мин;

в) выделение розового металла в белом; $T - 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t - 50$ мин;

г) включения «оранжевых» зёрен в белом металле и шлаке; $T - 800-1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка при $1300\text{ }^{\circ}\text{C} - 20$ мин;

Наиболее распространенными были включения с красновато-коричневым оттенком (рис. 3-б). По данным замеров на лазерном микроанализаторе, такой металл характеризовался высоким (8,0-19,5 %) содержания титана. Кроме включений в белом металле, при выдержке 50 мин, он наблюдался вблизи микрообъемов раскристаллизованного титанового шлака – в виде округлых выделений размером до 0,1 мм (рис. 2-д). При более интенсивном восстановлении «коричневели» даже крупные образования металла (рис.3-б).

Иногда в окатышах, восстановленных при температуре $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержках более 50 мин, в белом металле наблюдались мелкие неправильной формы включения розового цвета, что напоминало структуры эвтектики (рис.3-в). Химический состав «розового» металла при колебаниях Fe от 61 до 65 % и Ti от 0,07 до 3,43 % характеризовался повышенным содержанием Mn (1,25-2,00 %) V (0,49-1,15 %).

В тех же условиях, иногда сопровождая появление розового металла, но особенно, при ещё более интенсивном восстановлении в окатышах нередко фиксировались так называемые «оранжевые» зерна (рис.3-д). Обычно они были приурочены к зоне контакта металла со шлаком, распространяясь по обе стороны от него. Зерна оранжевого цвета по размеру редко превышали 0,05 мм, имели выступающий рельеф, что указывало на их высокую крепость, и характеризовались изометричной формой. Иногда даже угадывались сечения шести – восьмиугольных очертаний, что давало основание считать оранжевые зерна кристаллами. По данным лазерного микроанализа, основными элементами в оранжевых зернах являются Fe (49,9-11,4 %) и Ti (14,2-45,0). Повышено содержание Ni (до 0,02-0,03), V (до 1,4-2,4), Mg (до 0,3-0,5), Mn (от 1,2 до 7,7) по сравнению с белым металлом в тех же условиях восстановления.

Железосодержащие силикаты (оливин и пироксен) – примеси в титаномагнетитовом концентрате также изменяются в процессе его восстановления. Сначала, при температуре $800-900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в них, в твёрдой фазе, образуются мелкие (0,005-0,015 мм) кристаллы – включения магнетита, которые при $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ активно восстанавливаются до Fe^0 , покидающие передель силикатных зёрен. На их месте образуется высокотемпературный кварц-кристоболит (рис.4).

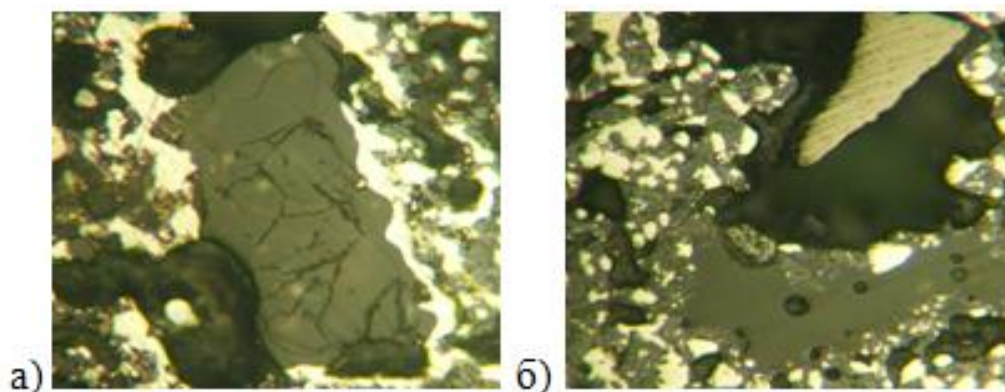


Рис. 4. Зерна силикатов, измененные в процессе интенсивного карботермического восстановления

Отраженный свет, без анализатора. Ув. 200^x. Белое – железо металлическое; кремное – остаточное зерно титаномагнетита; серое – кварц (кристаболит) с трещинами (а) и полуплавленное его зерно (б); черное – поры, пустоты и трещины.

а) Т – 1250 °С, t – 40 мин;

б) Т – 1300 °С, t – 50 мин.

При сравнительно низких температурах восстановления (1100-1250 °С) и небольших выдержках в кварце нередко наблюдаются ветвящиеся трещины (рис. 4-а), а с температуры 1300 °С при выдержках более 10 мин его зерна оплавляются (рис. 4-б) и в дальнейшем усваиваются расплавом: на поверхности крупных объемов расплывшегося титанового шлака (температура 1500 °С, выдержка 5 мин) нами наблюдались тонкие корочки силикатного стекла.

Заключение. Результаты исследований по карботермическому восстановлению титаномагнетитового концентрата Крапивенского месторождения с содержанием TiO_2 до 25 %, а также выявлению его механизма сводятся к следующим положениям:

- зерна исследованного концентрата имели размер от тысячных долей до 0,–0,8 мм. Они были многокомпонентными и характеризовались сложным прорастанием минеральных фаз на уровне распада твёрдого раствора, что выражалось в наличии магнетитовой матрицы и погруженной в неё «решетки» из ильменита (ульвешпинели). Реже, и в небольшом количестве, в виде цепочек мелких зерен наблюдались включения Mg- и Al- шпинелей. Кроме того, в некоторых рудных зернах были установлены сравнительно крупные (до 0,15 мм) включения – останцы оплавленного ильменита;

- сложность состава и структуры Крапивенского титаномагнетита обусловили многостадийность его изменения в процессе восстановления. В первую очередь, при температуре 1200 °С, восстанавливается магнетитовая матрица. Ильменитовая решетка, меняясь структурно и по составу, ещё долго, вплоть до температуры плавления ильменитовой составляющей, удерживает железо, постепенно снижая его содержание;

- восстановление концентрата при температурах выше 1200 °С совершается в трёх влияющих друг на друга фазах: остаточных зерен титаномагнетита, металле и шлаке;

- степень и скорость восстановления рудных зёрен зависит от размера: мелкие (до 0,07мм) сразу вовлекаются в процесс; крупные (до 0,6-0,8 мм) могут сохраняться до самых высоких температур. Крупнозернистые титаномагнетитовые концентраты рекомендуются измельчать, хотя бы до крупности 0,074 мм;

- чем больше интенсивность восстановления (определяется температурой и временем выдержки), тем выше ступень многостадийного изменения структуры и химического состава остаточных зерен титаномагнетита и крупнее выделения металла и шлака;

- более длительные (до 50-80 мин) выдержки при температуре 1300 °С ведут к увеличению в металле массовой доли, прежде всего, Ti (до 8,0-19,5), а также некоторых других элементов – Mg (до 0,3-0,5 %), V (до 0,5-2,4 %) заимствованных из шлака, т.е. металл снова наполняется примесями;

- температура восстановления 1300 °С, даже при выдержках 50-80 мин не обеспечивает ни качественного пространственного разобщения фаз металла и титанового шлака, ни концентрации в объемах, необходимых для их качественного разделения. Для этих целей необходимо применять более высокие температуры, вплоть до температуры плавления ильменитовой составляющей;

- при разработке режимов твердофазного карботермического восстановления титаномагнетитовых концентратов в интервале температур 800-1500 °С для достижения высококачественных рациональных результатов рекомендуется руководствоваться правилом – чем выше температура восстановления, тем меньше при ней должно быть время выдержки. Сочетание того и другого должно надежно обеспечивать оптимальную степень восстановления и структуру восстановленных материалов.

Список используемой литературы:

1. Олейник Т.А. Анализ разработанных технологий обогащения комплексных коренных титаносодержащих руд Украины / Т.А. Олейник // Вісник Криворізького технічного університету : зб-к наук. праць. – Кривий Ріг, 2007. – С. 92–96.
2. Разработка технологии обогащения комплексных руд Крапивенского месторождения / Л.С. Воробьева, Н.К. Воробьев, А.В. Габура и др. // Новое в технологии, технике переработки минерального сырья : сб-к науч. тр. – Кривой Рог : Механобрчермет, 2007. – С. 53–57.
3. Садыхов Г.Б. Исследование титанованадиевых шлаков процесса прямого получения железа из титаномагнетитовых концентратов / Г.Б. Садыхов, И.А. Карязин // Металлы. – 2007. – № 6. – С. 3–12.
4. Исследование одностадийного процесса металлизации титаномагнетита месторождения Гремяха-Вырмес / Д.С. Погудин, А.А. Морозов, Г.Б. Садыхов, Т.В. Олюнина, Л.И. Леонтьев // Цветные металлы. – 2011. – № 1. – С. 73–76.
5. Структурные преобразования зерен титаномагнетита в процессе карботермического восстановления. Ч. 1 / Д.Ю. Бабошко, В.В. Ткач, Г.В. Губин, С.Н. Зима // Электromеталлургия. – 2015. – № 2. – С. 8–14.
6. Структурные преобразования зерен титаномагнетита в процессе карботермического восстановления. Ч. 2 / Д.Ю. Бабошко, В.В. Ткач, Г.В. Губин, С.Н. Зима, Л.Н. Саитгареев // Электromеталлургия. – 2015. – № 3. – С. 14–16.
7. Зима С.Н. Минералого-петрографические особенности апатит-ильменит-титаномагнетитовой руды Крапивенского месторождения / С.Н. Зима // Новое в технологии, технике переработки минерального сырья : сб-к науч. тр. – Кривой Рог : Механобрчермет, 2007. – С. 40–52.
8. Зима С.Н. Особенности титаномагнетита Крапивенского месторождения на Волини / С.Н. Зима, Д.Ю. Бабошко // Горный журнал Казахстана. – 2015. – № 10. – С. 8–11.

References:

1. Olejnik, T.A. (2007), «Analiz razrobotannyh tehnologij obogashhenija kompleksnyh korennyh titanosoderzhashhih rud Ukrainy», *Visnik Krivoriz'kogo tehničnogo universitetu*, zbirnyk naukovykh prac', Krivij Rig, pp. 92–96.
2. Vorob'eva, L.S., Vorob'ev, N.K., Gabura, A.V. and others (2007), «Razrobotka tehnologyu obogashhenija kompleksnyh rud Krapyvenskogo mestorozhdenija», *Novoe v tehnologyu, tehnyke pererabotky myneral'nogo syr'ja*, sbornik nauchnyh trudov, Mehanobrchermet, Kryvoj Rog, pp. 53–57.
3. Sađyhov, G.B. and Karjazyn, Y.A. (2007), «Yssledovanye tytanovanadyevykh shlakov processa prjamoogo poluchenija zheleza yz tytanomagnetitovykh koncentratov», *Metally*, No. 6, pp. 3–12.
4. Pogudyn, D.S., Morozov, A.A., Sađyhov, G.B., Oljunyna, T.V. and Leont'ev, L.Y. (2011), «Yssledovanye odnostadyjnogo processa metallyzacyu tytanomagnetitya mestorozhdenija Gremjaha-Vyrmes», *Svetnyye metally*, No. 1, pp. 73–76.
5. Baboshko, D.Ju., Tkach, V.V., Gubyn, G.V. and Zyma, S.N. (2015), «Strukturnye preobrazovanyja zeren tytanomagnetitya v processe karbotermycheskogo vosstanovlenija», in parts, Part 1, *Elektrometallurgyja*, No. 2, pp. 8–14.
6. Baboshko, D.Ju., Tkach, V.V., Gubyn, G.V., Zyma, S.N. and Saytgareev, L.N. (2015), «Strukturnye preobrazovanyja zeren tytanomagnetitya v processe karbotermycheskogo vosstanovlenija», in parts, Part 2, *Elektrometallurgyja*, No. 3, pp. 14–16.
7. Zyma, S.N. (2007), «Myneralogo-petrografyčeskye osobennosti apatyt-yl'menyt-tytanomagnetitovoj rudy Krapyvenskogo mestorozhdenija», *Novoe v tehnologyu, tehnyke pererabotky myneral'nogo syr'ja*, sbornik nauchnyh trudov, Mehanobrchermet, Kryvoj Rog, pp. 40–52.
8. Zyma, S.N. and Baboshko, D.Ju. (2015), «Osobennosti titanomagnetita Krapivenskogo mestorozhdenija na Volyni», *Gornyj zhurnal Kazahstana*, No. 10, pp. 8–11.

Бабошко Дмитрий Юрьевич – ассистент кафедры металлургии черных металлов и литейного производства ГВУЗ «Криворожский национальный университет».

Научные интересы:

– восстановление титаномагнетитов;

– прямое восстановление железа.

E-mail: metall.babochko@gmail.com.

Зима Светлана Николаевна – кандидат геолого-минеральных наук кафедры геологии и прикладной минералогии ГВУЗ «Криворожский национальный университет».

Научные интересы:

– изучения состава, свойств, структуры и условий образования минералов.

Губин Георгий Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии черных металлов и литейного производства ГВУЗ «Криворожский национальный университет».

Научные интересы:

- бескоксовая металлургия железа;
- восстановление хромовых руд.

Саитгареев Леван Наильевич – доцент кафедры металлургии черных металлов и литейного производства ГВУЗ «Криворожский национальный университет».

Научные интересы:

- художественное и ювелирное литье;
- моделирование технологических процессов.

E-mail: slevann@rambler.ru.

Воденикова Оксана Сергеевна – доцент кафедры металлургии черных металлов «Запорожская государственная инженерная академия».

Научные интересы:

- композиционные материалы;
- свойства горячепрессованных углерод-алюминиевых композитов.

Стаття надійшла до редакції 16.11.17.