

Г.А. Колобов <sup>(1)</sup>, профессор, к.т.н.  
В.В. Криворучко <sup>(2)</sup>, мл. научн. сотрудник  
И.Г. Парфенюк <sup>(2)</sup>, ст. научн. сотрудник  
Ю.В. Поплавский <sup>(2)</sup>, ст. научн. сотрудник  
Ю.В. Курис <sup>(1)</sup>, доцент, к.т.н.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ИЛЬМЕНИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ИЗМЕНЕНИЯ

<sup>(1)</sup> Запорожская государственная инженерная академия,

<sup>(2)</sup> Государственный научно-исследовательский и проектный институт титана, г. Запорожье

Досліджено залежності питомої електричної провідності ільменітових концентратів від ступеня їх змінювання та температури. Одержані результати будуть використані при оптимізації електричного режиму печей для виплавки титанових шлаків.

Исследованы зависимости удельной электрической проводимости ильменитовых концентратов от степени их изменения и температуры. Полученные результаты будут использованы при оптимизации электрического режима печей для выплавки титановых шлаков.

*Введение.* Ильменитовые концентраты являются основным видом титанового сырья, составляя 90...95 % от перерабатываемых титаносодержащих концентратов. Основной минералообразующий компонент данного концентрата – ильменит  $FeO \cdot TiO_2$  ( $FeTiO_3$ ). Ильменит стехиометрического состава (52,7 %  $TiO_2$  и 47,3 %  $FeO$ ) встречается очень редко и обычно содержит такие примеси, как  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$ .

Ильменит магматических месторождений (коренных) является неизменным, а экзогенных месторождений (россыпных) – в различной степени изменен процессами выветривания. Изменение ильменита протекает в два этапа. Первый заключается в постепенном окислении и выщелачивании железа вплоть до полного его перехода из двухвалентной формы в трехвалентную, то есть до исчезновения ильменитовой фазы. Второй этап включает превращение продукта первого этапа изменения и состоит из выщелачивания железа (III) и перекристаллизации диоксида титана в лейкоксен и рутил. Процесс этот ступенчатый с отсутствием четких границ между превращениями.

Таким образом, с усилением измененности в ильмените увеличивается содержание  $TiO_2$ , уменьшается количество  $FeO$ , содержание  $Fe_2O_3$  вначале возрастает, а затем снижается. Продукт, находящийся на определенном этапе первой стадии данного процесса, называют измененным ильменитом, а продукт, образующийся в ходе второго этапа изменения, следует относить к лейкоксену и рутилу. При изменении ильменита изменяется его кристаллическая решетка, химический состав и физические свойства.

Как показали исследования [1], продукты изменения ильменита не входят в его структуру, а представлены свободным диоксидом титана в виде рутила и свободным гематитом  $Fe_2O_3$ .

По ряду объективных причин (истощение богатых месторождений, повышение спроса на сырье и др.) в производство вовлекается все большее количество ильменитовых концентратов, для которых характерно разнообразие химических составов не только по примесям, но и по основным компонентам.

---

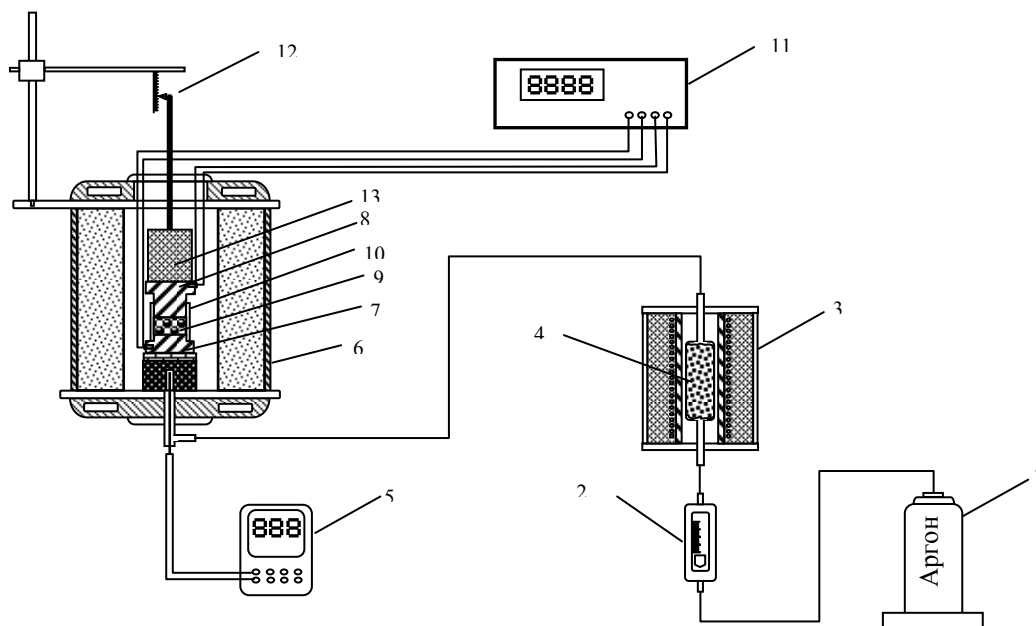
© Колобов Г.А., Криворучко В.В., Парфенюк И.Г., Поплавский Ю.В., Курис Ю.В., 2012

Для значительной части технологий переработки титаносодержащего сырья решающее значение имеет концентрация диоксида титана. В большинстве случаев низкое содержание данного компонента в природных концентратах не позволяет не-посредственно использовать их в технологическом процессе. Поэтому предварительно проводят карботермическое обогащение концентратов в руднотермических печах, в результате чего шлак обогащается  $TiO_2$ , а железо, восстанавливаясь из оксида, переходит в металлическую форму. Руднотермические печи (РТП) относятся к классу электрических дуговых печей прямого нагрева. Одним из важнейших параметров, необходимых для электротехнических и геометрических расчетов РТП, является электрическая проводимость шихтовых материалов, которая в значительной мере определяет электрические характеристики печи [2].

В процессе выплавки титановых шлаков в РТП шихтовые материалы испытывают совместное воздействие ряда факторов, претерпевая физико-химические превращения, что приводит к значительному изменению их электропроводности по периодам плавки. Для оптимизации электрического режима работы РТП были разработаны алгоритмы управления, которые учитывают электропроводность материалов на каждом этапе плавки [3].

*Постановка задачи.* Целью данного исследования является определение зависимости удельной электрической проводимости ильменитовых концентратов от степени их изменения и температуры.

*Методика эксперимента.* Измерения проводили по разработанной методике на установке, схема которой приведена на рис. 1.



1 - источник аргона; 2 - ротаметр; 3 - установка для осушения аргона; 4 - титановая губка; 5 - термопара и показывающий прибор; 6 - печь Таммана; 7, 8 - измерительные электроды; 9 - исследуемый материал; 10 - кварцевый стакан; 11 - RLC-метр; 12 - измеритель уровня; 13 - груз

**Рисунок 1** - Схема установки для измерения электропроводности твердых шихтовых материалов.

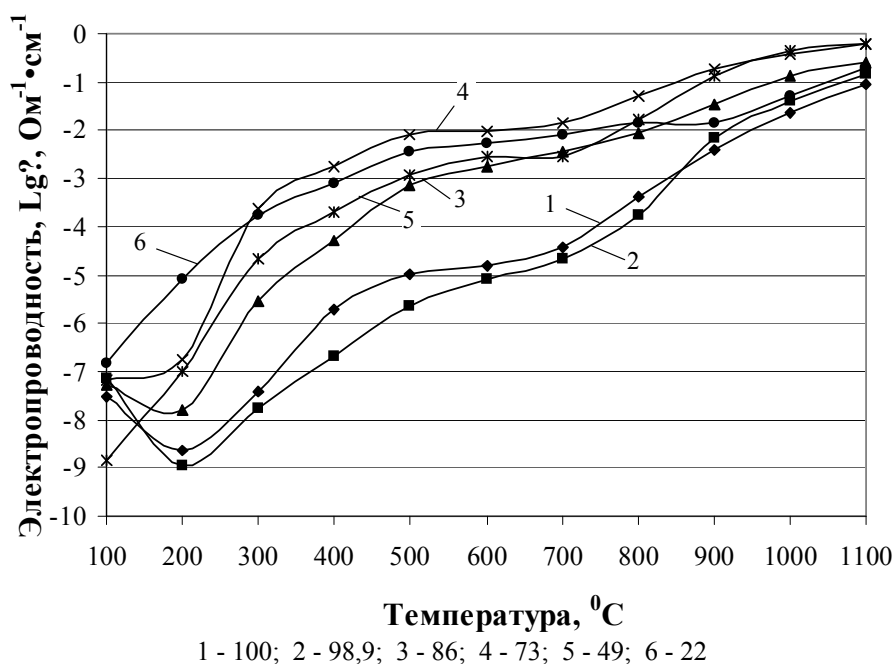
В качестве нагревательного модуля использовали печь Таммана 6, в которой размещали измерительную ячейку. Температуру в печи контролировали при помощи термопары и показывающего прибора 5. Измерительная ячейка

представляла собой вертикально установленный кварцевый цилиндр 10, полость которого сверху и снизу ограничена токопроводящими электродами 7 и 8, между которыми размещали заданное количество исследуемого материала 9. Электроды подключали к RLC-метру 2820, измерительный сигнал которого фиксировал сопротивление замыкающего цепь столбика шихты. Заданную величину давления на столбик исследуемых материалов ( $0,4 \text{ кг/см}^2$ ) задавали грузом 13. Объемные изменения слоя материала по высоте фиксировали с использованием измерителя уровня 12. Процесс осуществляли в токе аргона, предварительно осушая его пропусканием через слой нагретой титановой губки 4. Расход аргона, подаваемого из источника 1, контролировали ротаметром 2.

В качестве исследуемых материалов использовали шесть видов ильменитовых концентратов различных месторождений. Степень изменения концентрата определяли по соотношению компонентов, входящих в его состав, оценивая, таким образом, долю распада ильменитовой фазы.

Наряду с такими факторами, как химический состав, температура, давление на столб материала, на проводимость концентрата может оказывать влияние его фракционный состав. Поскольку исследуемые концентраты относятся к разным месторождениям, то обладают различным фракционным составом, однако из-за незначительного отличия крупности материала и трудностей, связанных с интерполяцией данных для концентратов, приведенных к одному фракционному составу, влияние данного фактора не учитывали.

*Результаты и их обсуждение.* Как видно из рис. 2, зависимость электропроводности ильменитовых концентратов от температуры достаточно сложна, однако можно проследить ряд закономерностей. Во-первых, с ростом температуры от  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  электропроводность концентратов увеличивается. Не вдаваясь в причины и механизмы данного явления, следует отметить, что такой характер температурной зависимости и диапазон изменения проводимости ( $5 \cdot 10^{-8} \dots 0,32 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ) характерен для оксидных полупроводников. Во-вторых, в диапазоне температур  $100 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается снижение электрической проводимости концентратов со степенью изменения  $86 \%$  и выше (особенно это проявляется для концентратов с более высокой измененностью). При нагреве концентратов со степенью изменения от  $49$  до  $22 \%$  наблюдается увеличение проводимости во всем интервале исследуемых температур.



**Рисунок 2** – Зависимость электрической проводимости ильменитовых концентратов с различной степенью изменения от температуры (степень изменения дана в процентах):

Увеличение электросопротивления при нагреве от 100 до 200 °С, скорее всего, обусловлено природой проводимости гематита и диоксида титана, которые в данном диапазоне температур имеют одинаковый характерный излом кривых электропроводности [4]. Что касается кривой для концентрата со степенью изменения 73 %, то в интервале температур 100 ... 300 °С она занимает промежуточное положение между кривыми как для более, так и для менее измененных концентратов. В свою очередь, более высокая проводимость данного концентрата при температуре выше 300 °С не вписывается в общий характер кривых, и объяснение подобного поведения требует дополнительных исследований.

В результате измерений было установлено, что при температуре 100 °С проводимость сильноизмененных концентратов составила в среднем около  $5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а при температуре 1100 °С увеличивается до  $0,161 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Проводимость слабоизмененных концентратов составила  $1 \cdot 10^{-8}$  и  $0,4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  соответственно для температуры 100 и 1100 °С.

В отношении влияния измененности концентрата на проводимость можно сказать, что для слабоизмененных концентратов характерно отсутствие падения значения проводимости в интервале 100...200 °С. С уменьшением степени изменения концентратов скорость роста проводимости при повышении температуры увеличивается. Отмечается также тенденция к уменьшению значения проводимости с ростом степени изменения концентрата.

#### *Выводы*

1. Электропроводность ильменитовых концентратов в интервале температур 100...1100 °С нелинейно увеличивается. При температуре 100 °С проводимость сильноизмененных концентратов составляет в среднем  $5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а слабоизмененных -  $1 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . При температуре 1100 °С значения проводимостей составляют  $0,161$  и  $0,4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  соответственно для сильно- и слабоизмененных концентратов. В интервале температур от 100 до 1100 °С величины проводимости всех концентратов отличаются более чем в 14000 раз.

2. Для ильменитовых концентратов со степенью изменения 86 % и более в интервале температур 100...200 °С характерно снижение проводимости. Для менее измененных концентратов подобный излом кривой «проводимость – температура» отсутствует. В целом, с уменьшением степени изменения концентратов скорость роста проводимости при повышении температуры увеличивается.

3. В интервале температур 200...1100 °С отмечается тенденция к снижению значения проводимости ильменитовых концентратов с ростом степени изменения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кошкаров, И. Ф. Методические рекомендации по оценке измененности ильменита при изучении титановых руд и продуктов их переработки [Текст] // Сост. И. Ф. Кошкаров, Ю. А. Полканов. – Симферополь : Институт минерального сырья, 1976. – С. 11-46.
2. Электрические параметры процесса выплавки титановых шлаков [Текст] / Ю. В. Поплавский, И. Г. Парфенюк, Г. А. Колобов и др. // *Металургія : наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя* : РВВ ЗДІА, 2009. – Вип. 20. – С. 51-55.
3. Исследования процесса выплавки титанового шлака в руднотемических печах и разработка оптимального алгоритма управления электрическим режимом [Текст] / Т. П. Гу-рьянова, Ю. В. Поплавский, И. Г. Парфенюк и др. // *Ti- 2007 в СНГ* : сб. трудов

международ. конф., 15-18.04.2007 г., Ялта). – К. : ИМФ им. Г.В.Курдюмова НАН Украины, 2007. – С. 112-116.

4. *Денисов С. И.* Электропроводность твердых шихтовых материалов для выплавки титано-вых шлаков [Текст] / С. И. Денисов, Б. И. Закуркин, А. А. Каменева // *Металлургия и химия титана : сб. трудов Института титана. – Т. 9. – М. : Metallurgia, 1973. – С. 9-12.*

Стаття надійшла до редакції 07.06.2011 р.

Рецензент, проф. В.П. Грицай