

# МЕТАЛЛУРГИЯ

---

---

МРНТИ 53.31.21

*Н.З. Нурғали<sup>1</sup>, М.С. Алмағамбетов<sup>1</sup>, А.С. Байсанов<sup>2</sup>,  
Е.У. Жұмағалиев<sup>3</sup>, Б.С. Келаманов<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG,  
г. Актобе, Казахстан

<sup>2</sup>Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева,  
г. Караганда, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский агротехнический университет им.С.Сейфуллина,  
г. Нур-Султан, Казахстан

<sup>4</sup>Актюбинский региональный государственный университет  
им.К.Жубанова, г. Актобе, Казахстан

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕРАБОТКИ ТИТАНОВОГО И ХРОМИТОВОГО СЫРЬЯ С ПОЗИЦИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ-ДИАГРАММНОГО АНАЛИЗА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ТИТАНА И ХРОМА

---

---

**Аннотация.** Приведены результаты термодинамически-диаграммного анализа оксидных продуктов плавки от переработки хромитового и титанового сырья с целью определения их наиболее технологичных составов, позволяющих рационально использовать сырьевые и энергетические ресурсы. Подтверждён тот факт, что термодинамически-диаграммный анализ (ТДА) при котором пренебрегается сложный математический аппарат, позволяет с помощью диаграмм фазового строения многокомпонентных систем прогнозировать оптимальные области составов более технологичных шлаков. Достоверность эффективности указанных разработок подтверждена испытаниями, осуществлёнными в опытно-промышленном и промышленном масштабах.

**Ключевые слова:** оксид титана, оксид хрома, термодинамика, технология, диаграмма состояния

• • •

**Түйіндеме.** Жұмыста шикізат және энергетикалық ресурстарды ұтымды қолдануға мүмкіндік беретін оңтайлы технологиялық құрамын анықтау мақсатында хромит және титан шикізаттарын қайта еңдеуден түзілген балқытудың тотықты енімдерін термодинамикалық-диаграммалық зерттеу нәтижесі келтірілген. Термодинамикалық-диаграммалық талдау (ТДА) күрделі математикалық аппарат елемегенде, фазалық құрылым диаграммасының кемегімен кеп-компонентті жүйелердің неғұрлым технологиялық қождар құрамдарының оңтайлы аймақтарын болжауға

мүмкіндік беретіні дәлелденді. Керсетілген жұмыста тиімділіктің дұрыстығы тәжірибелік-энергетік және энергетік деңгейлерде жүзеге асырылған сынақтармен дәлелденеді.

**Түйінді сөздер:** титан тотығы, хром тотығы, термодинамика, технология, күй диаграммасы.

\*\*\*

**Abstract.** The paper presents the results of a thermodynamic diagram study of oxide smelting products from the processing of chromite and titanium raw materials in order to determine their most technologically advanced compositions, allowing for rational use of raw materials and energy resources. It is confirmed that thermodynamically-diagram analysis (TDA) in which the complex mathematical apparatus is neglected, allows using diagrams of the phase structure of multi-component systems to predict the optimal regions of the compositions of more technological slags. The reliability of the effectiveness of these developments was confirmed by tests carried out on a pilot industrial and industrial scale.

**Key words:** titanium oxide, chrome oxide, thermodynamics, technology, state diagram

**Введение.** Диаграммы состояния разнообразных систем содержат в себе ценную информацию о составе и структуре предполагаемых продуктов плавки и служат для получения расплавов максимально близких к заданным составам и определенной температурной зоны процесса, тем самым, прогнозируя их свойства и способы технологических режимов получения.

В современной научно-прикладной металлургии, важное место занимает изучение строения жидких расплавов, полученных пирометаллургической переработкой различных сырьевых материалов. Как правило, исходное сырье, будь то руда или концентрат, содержат в своем составе соединения не устойчивые в жидком состоянии, т.е. распадающиеся на стабильные составные части после преодоления их температуры ликвидуса. Общепринятые термодинамические исследования процессов в многокомпонентных системах достаточно сложны и требует применения обширных математических расчетов и напрямую связаны с необходимостью определения термодинамических функций большого количества независимых реакций. Во многом некоторые данные о свойствах веществ необходимых для определения свободной энергии Гиббса реакций, ограничены или вообще отсутствуют, что в подобных случаях исключает применимость термодинамического анализа для изучения многокомпонентных систем [1].

Термодинамически-диаграммный анализ (ТДА) сложных систем, зарекомендовал себя, как наиболее простой и при этом точный метод изучения фазовых закономерностей в сравнении с классическим термодинамическим исследованием процессов металлургии.

Эффективность метода как приложения к металлургической технологии, подтверждает возможность выявлять особенности фазового строения образующихся расплавов в процессе металлургического передела различных сырьевых материалов. На основе результатов таких исследований строят диаграммы фазового состава, позволяющие проследивать фазовый метаморфизм и прогнозировать конечное состояние отдельно взятой системы, моделирующей состав исследуемого расплава. На основе результатов ТДА многокомпонентных систем разработаны технологии переработки титанового и хромитового сырья с получением:

- рафинированных марок феррохрома с применением в качестве восстановителя ферросиликоалюминия с достижением стабилизации шлаков и повышении технико-экономических показателей и т.д.;
- богатого титанового шлака переработкой хром- и ванадийсодержащих ильменитовых концентратов удовлетворяющего предъявляемые требования потребителей;
- низкопроцентного ферротитана из ильменитовых концентратов со снижением угара и расхода дорогостоящего алюминиевого порошка до 50% с получением стандартных по составу марок (ГОСТ 4761-91) за счет применения ферросиликоалюминия;
- высокопроцентного ферротитана (до 70% титана) из богатого титанового шлака алюминотермическим восстановлением.

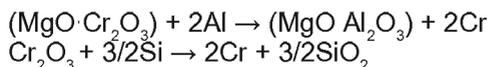
**Цель работы** – проведение глубоких физико-химических исследований термодинамики процессов шлакообразования многокомпонентных систем оксидов, моделирующих составы образующихся шлаков при выплавке сплавов на основе хрома и титана.

**Система  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ .** Использование отечественных высокомагнезиальных руд ( $\text{MgO}$  около 20%) при получении рафинированного феррохрома привело к ухудшению технико-экономических показателей выплавки. В частности, увеличились удельный расход электроэнергии и шихтовых материалов, потери недовосстановленного хрома с отвальными шлаками, а также кратность шлака. В современной ферросплавной промышленности Казахстана рафинированные сорта феррохрома получают силикотермическим методом (Актюбинский завод ферросплавов), сопровождающийся образованием саморассыпающегося пылевидного шлака основностью  $\text{CaO/SiO}_2$  более 2,0. В качестве восстановителя обычно используется ферросиликохром с содержанием 48-50% Si. При этом чтобы весь кремний ферросиликохрома окислился кислородом хромовой руды с достижением остаточного содержания Si в товарном металле до 2% и для связывания образующегося активного кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) в прочные силикаты в шихту вводят большое количество извести. Полученные при такой технологии шлаки являются высокоосновными, в структуре которых

присутствует значительное количество двухкальциевого силиката ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). Последний претерпевает фазовые переходы при низких температурах с увеличением объёма кристаллической решетки, что приводит к рассыпанию шлака. Отсюда возникает необходимость получения составов шлаков, в которых присутствие двухкальциевого силиката ограничено. Этого можно достичь путем увеличения в шлаке оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), который является достаточно активным по отношению к кремнезему. Кроме того,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  легко разрушает тугоплавкую хромомagneзиальную шпинель ( $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Освобожденный от шпинельной связки  $\text{MgO}$  может замещать  $\text{CaO}$ , упреждая образование двухкальциевого силиката, что позволяет снизить добавку в шихту извести и соответственно снизить основность шлака. К тому же увеличение количества  $\text{Al}_2\text{O}_3$  благоприятно сказывается на физико-химических свойствах шлаков, таких как жидкотекучесть, вязкость и др. [2].

Для получения повышенного содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке при силикотермическом получении рафинированного феррохрома требуется восстановитель, который в своем составе содержит кроме кремния и алюминий. Таким восстановителем является разработанный на базе Химико-металлургического института им. Ж. Абишева комплексный сплав – ферросиликоалюминий (ФСА) [3].

В основе восстановления хромовой руды кремнием и алюминием лежат реакции:

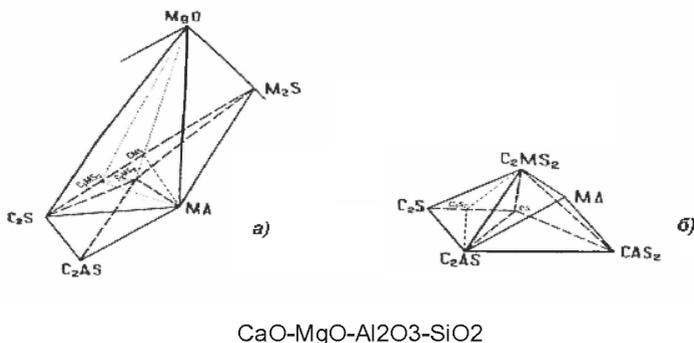


В процессе плавки с использованием комплексного сплава ФСА происходит расплавление шихтовых материалов, сопровождаемое взаимодействием магнезиальной хромовой шпинели с алюминием восстановителя. В дальнейшем происходит разрушение хромомagneзиальной шпинели с образованием химически устойчивых глиноземсодержащих шпинелей. Такое взаимодействие повышает скорость и полноту восстановления хрома из шпинели кремнием ферросиликоалюминия.

При выплавке рафинированных сортов феррохрома с применением ФСА образуются шлаки кардинально нового состава. Если по существующей технологии получают шлаки, расположенные по основности и уровню содержания оксидов алюминия и магния в области высокоосновных шлаков в фазовом пространстве четырехкомпонентной системы  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (рисунок 1 а), т.е. в подсистеме  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  (где в любой её части доминирует двух-

кальциевый силикат), то по новой технологии шлаки образуются в другой области системы  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , а именно, в её второй части (рисунок 1 б), оконтуренной фазами  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\text{-MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\text{-CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\text{-CaO}\cdot\text{SiO}_2$  [4].

Рисунок 1 – Высокоосновная (а) и среднеосновные части (б) системы



В ней двухкальциевый силикат уже не доминирует. Его существование в фазовом пространстве последней области системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$  простирается только до плоскостей (тройных квазисистем):  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$  (ранкинит)- $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  (геленит)- $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$  (акерманит),  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  (магнезиальная шпинель) -  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  -  $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$  (акерманит) и  $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$  (акерманит)- $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  (магнезиальная шпинель) -  $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$  (форстерит). Ниже этих плоскостей двухкальциевый силикат вовсе не образуется в шлаках.

При этом получаемые по новому способу шлаки формируются именно ниже этих областей, так как в них отношение  $\text{CaO/SiO}_2$  не превышает 1,5, содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  гарантированно более 12%, а оксида магния – более 15%. В этом отношении такие шлаки можно отнести почти к типу классических доменных и ферромарганцевых (высокоуглеродистого), но с высоким содержанием оксидов алюминия и магния. Практика показывает, что подобные шлаки термодинамически стабильны и абсолютно не подвержены рассыпанию. Кроме этого оксид хрома в таких шлаках химически не связан с другими оксидами, т.к. необходимые для образования хромитов кальция ( $\text{CaO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) и магнезиохромита ( $\text{MgO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) оксиды кальция и магния расходуются на формирование термодинамически очень прочных соединений типа форстерит ( $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ ),  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  (магнезиальная шпинель),  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  (геленит),  $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$  (акерманит) и волла-

стонит ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), одновременно обеспечивая низкую активность кремнезема и глинозема в шлаке. Благодаря снижению основности и роста содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  шлак не рассыпается и уменьшается его кратность, в отличие от стандартной технологии, где основность шлака составляет  $>1,8$ .

По данной технологии плавку производили с загрузкой на подину печи всей навески ФСА первой колоши и сразу же после зажигания дуги загружали рудно-известковую часть первой колоши. Колоша состояла из 20 кг хромитовой руды, 4,6 кг ФСА и 8,5 кг известки ( $\text{CaO} > 90\%$ ). На одну плавку расходовали две колоши (навески) вышеуказанного состава. Вторая навеска подавалась в печь также постепенно после образования шлакового слоя в ванне печи. Выпуск металла и шлака осуществляли через одну летку в чугунные изложницы, установленные каскадом. После охлаждения расплава металл и шлак взвешивали и из них отбирали пробы на химический анализ.

Полученный металл содержал в среднем 65-67% Cr, 0,8-1,5% Si, 1-3% C. Слитки металла были плотными без газовых раковин и ликваций, с нитевидной структурой на изломе, характерной для рафинированных хромистых сплавов. Средневзвешенный химический состав шлака, выплавленного по новому способу, был следующим, %:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  - 4,79;  $\text{SiO}_2$  - 24,02;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 13,18;  $\text{CaO}$  - 34,42;  $\text{MgO}$  - 22,36;  $\text{FeO}$  - 1,2; P - 0,031, а основность по  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  составлял 1,43. Шлаки после остывания получались твердыми, камневидными, хорошо отделялись от металла и не рассыпались в мелкодисперсный порошок [4-5].

В дальнейшем, для достоверности полученных результатов крупнолабораторных исследований были осуществлены промышленные испытания по выплавке рафинированного феррохрома в условиях АктЗФ филиала «ТНК «Казхром» с использованием брикетированной шихты, состоящей из хромовой руды и механической смеси ферросиликохрома и алюминиевого порошка. При этом соотношение ферросиликохрома и алюминиевого порошка в смеси подбиралось таким образом, чтобы содержание кремния и алюминия в них соответствовало ФСА марок ФС55А20, ФС65А20, т.е. происходило моделирование химического состава ФСА. В период испытаний в общей численности было проведено 53 экспериментальных плавов при различных расходах брикетов и флюсующей добавки. Опробованная технология отличалась устойчивостью, и позволяло улучшить технико-экономические показатели процесса производства рафинированного феррохрома, характеризуясь следующими данными:

- увеличение полезного использования хрома и кремния восстановителя на 8% и 12%, соответственно;
- снижение расхода известки на 10%;
- снижение удельного расхода электроэнергии на 9%.

Таким образом, технология производства рафинированного феррохрома с применением в качестве восстановителя ФСА по сравнению со стандартной технологией обладает следующими преимуществами:

- сокращение количества флюсующей добавки (извести) и уменьшение кратности шлака;
- повышение извлечения хрома в металл и получение нерассыпающегося шлака;
- сокращение длительности плавки и расхода электроэнергии;
- отпадает необходимость использования ферросиликохрома как восстановителя в технологической схеме получения рафинированных сортов феррохрома, что позволит экспортировать выплавляемый в настоящее время ферросиликохром как конечный товарный продукт.

**Система  $TiO_2-Al_2O_3-SiO_2-CaO-MgO$ .** Железо-титановые руды, обнаруженные в недрах Казахстана представлены рядом россыпных месторождений, из которых наиболее известные: Сатпаевское (ВКО), Шокашское (Актюбинская обл.) и Обуховское (СКО) [6]. На «УК ТМК» при производстве губчатого титана основным сырьем является богатый титановый шлак (БТШ). С целью частичного импортозамещения сырья на базе этого предприятия в 1999 г. сдан в эксплуатацию цех по выплавке БТШ в стационарной руднотермической электропечи. Там перерабатываются ильменитовые концентраты, произведенные из близлежащих железо-титановых руд Сатпаевского месторождения. Концентраты характеризуются повышенным содержанием нежелательных примесей, т.е. оксидов ванадия (до 0,6%) и ниобия, негативно влияющих на дальнейший процесс хлорирования полученного шлака. В настоящее время в нашей стране отсутствуют промышленные предприятия по выпуску сплавов и лигатур с титаном. Основным поставщиком титаносодержащих сплавов является РФ, полуфабрикаты поставлялись на «Арселор Миттал Темиртау» для раскисления низколегированных марок сталей. В прошлом на Актюбинском ЗФ производили сплав титана с железом (марочный ферротитан 27% Ti) традиционным внепечным алюминотермическим восстановлением привозного ильменитового концентрата, однако ввиду определенных обстоятельств вскоре выпуск продукции был законсервирован.

Проблемы, возникающие в процессе хлорирования БТШ, полученных от плавки отечественных концентратов, во многом зависят от уровня примесных элементов переходящих из ильменитовых концентратов в шлак. При этом свойства БТШ могут колебаться в широких пределах и поэтому напрямую зависят от происхождения (генезиса) разрабатываемого месторождения. В этой связи для по-

лучения качественной продукции на стадии рудовосстановительной электроплавки концентратов, необходимо перевести примесные компоненты (оксиды железа, ванадия, хрома и ниобия) в побочный продукт с получением природнолегированного углеродистого металла. Поэтому перед нами поставлена задача, изыскать методы и приемы для максимального их восстановления. Комплексное использование ильменитовых концентратов требует более детального изучения поведения титана и вмещающих примесей в процессе получения БТШ.

Реальные богатые титановые шлаки (БТШ), предназначенные для получения губчатого титана, и шлаки от производства ферротитана представляют собой многокомпонентную систему оксидных продуктов восстановительной плавки ильменитовых концентратов, однако их основу составляет относительно небольшое количество оксидов. Фазовый состав БТШ и шлаков ферротитана можно охарактеризовать пятикомпонентной системой  $\text{TiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ .

Учитывая вышесказанное, возникает необходимость изучения физико-химических и металлургических свойств концентратов и оксидных расплавов. Во-первых, это связано с определением фазового состава полученных БТШ и шлаков от производства сплавов на основе титана и объемов их расположения в пятикомпонентной системе  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$ , а также изучения динамики их изменения под влиянием различных факторов. Использование в этом случае инструментальных методов, требует существенных материальных затрат и времени. В последние годы получают развитие теоретические методы оценки фазового состава многокомпонентных оксидных расплавов, постановка соответствующих исследований явилась целесообразным, что было предусмотрено в настоящей работе.

Первоочередным является изучение фазового состава образующихся шлаков и определение объемов их расположения в пятикомпонентной системе  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$ , а также исследования комплекса металлургических и физико-химических свойств Шокашских концентратов и шлаковых расплавов для разработки эффективных технологических процессов производства БТШ и сплавов на основе титана. При исследовании стабильного состава системы  $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO-CaO}$  методом ТДА необходимо исходить от разбивки пяти граничных подсистем  $\text{TiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2\text{-CaO-MgO-SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  и  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  на стабильные элементарные политопы, т.е. осуществления термодинамических расчетов отдельно взятых независимых реакций и объединения нестабильных от температуры треугольников и тетраэдров в их стабильные аналоги. Достоверность полученных результатов проведенных исследований с внесением уточнений подтверждается суммой объемов стабильных тетраэдров каждой граничной подсистемы.

стемы рассчитанных по методам «центра тяжести» и «Хиза», они идентично равны 1 (единице) [7].

Приведенные данные по граничным четырехкомпонентным системам являются основополагающим для непротиворечивого разбиения пятикомпонентной системы  $TiO_2$ -CaO-MgO- $Al_2O_3$ - $SiO_2$  моделирующей состава образующихся в ходе процессов получения БТШ и ферротитана, шлаков, на стабильные пентатопы (пятивершинные объемы). Таким образом, исследованные фазовые равновесия конгруэнтно (стабильно) плавящихся соединений пятерной системы  $TiO_2$ -CaO-MgO- $Al_2O_3$ - $SiO_2$  моделирующей состава титановых шлаков и шлаков алюмино-, алюминиосиликотермического получения сплавов на основе титана, а также шлаковых расплавов от плавки титаномагнетитовых руд и т.д., привели к тому что она состоит из 30 стабильных пентатопов (объемов).

Принятые данные можно обработать аналитически с получением уравнений для изучения ее физико-химических свойств отдельно взятых составов. Простейший и доступный для программного расчета метод выведения уравнений трансформации, выражающих любую вторичную подсистему через первичные компоненты ( $TiO_2$ , CaO, MgO,  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ ) базовой системы изложен в известной работе Хиза. Критерием месторасположения заданного состава расплавов в одной из подсистем, является положительные величины n-го количества вторичных компонентов определенного объема, в который входит химический состав образующихся шлаков.

Применение результатов ТДА относительно к богатым титановым шлакам и шлакам от производства сплавов на основе титана, заключается в нахождении элементарных пентатопов моделирующих их составы и нормативное распределение первичных фаз между вторичными соединениями рассматриваемого пентатопа. Для определения технологичности образующихся шлаков в процессе плавки (температуру плавления, жидкотекучесть и т.д.), необходимо пересчитать их средневзвешенные вещественные химические составы (как в таблице 1) на пять первичных оксидов системы Т-А-С-М-С. В результате выяснилось, что богатые титановые шлаки и шлаки ферротитана, полученные из концентратов Шокашского месторождения, расположены в пентатопах под №29 и 24, соответственно, а составы БТШ от плавки Сатпаевского и Обуховского концентратов моделируются пентатопами под №18 и 29, соответственно. Далее с учетом данных о температурах плавления вторичных компонентов определенного пентатопа моделирующий состав нужного шлака, можно предварительно определить его температуру плавления и плавкость.

**Таблица 1 – Средневзвешенный химический состав шлаков, полученных от плавки различных концентратов**

Шлак	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Шокашского	88,86	0,27	0,3	6,254	4,31
Сатпаевского	85,27	0,6	0,5	7,3	6,74
Обуховского	87,35	0,7	0,78	6,4	4,1
Ферротитана*	22,95	17,4	3,45	45,8	10,4

\* - по разработанной в ХМИ технологии получения низкопроцентного ферротитана из Шокашского концентрата с применением ферросиликоалюминия.

Из приведенных теоретических данных следует подтверждение того факта, что ТДА анализ при котором пренебрегается сложный математический аппарат, позволяет с помощью диаграмм фазового строения многокомпонентных систем установить оптимальные области составов более технологичных шлаков с относительной низкой температурой плавления, хорошей жидкоподвижностью и т.д.

Практически применив метод термодинамически-диаграммного исследования шлаковых расплавов с целью понижения содержания вредных примесей в богатых титановых шлаках, изучено влияние присадки различных каталитических добавок на поведение ванадия и хрома в нем. В результате установлено, что добавки в шихтовую смесь отходов производства ферромарганца дают положительный результат. Использовали оборотный металл со шлаковыми включениями, с содержанием металлофазы – 80-90%. Этот материал задавали в печь в количестве 1-5% от веса концентрата.

На базе этих результатов проводили опытно-промышленные испытания на руднотермической печи рафинировочного типа мощностью 0,1 МВ·А. Были переплавлены ильменитовые концентраты различных месторождений (ванадий, – и хромсодержащих) из представительных проб исходного сырья с отработкой технологии переработки ее на различных шлаковых и электрических режимах [8].

Результаты испытаний по изучению и отработке режимов получения высокотитанистых шлаков из ильменитовых концентратов отечественных месторождений показали, что при добавке в шихту оборотных отходов производства ферромарганца в пределах 2-4% от веса титанового сырья обеспечивается более полное извлечение хрома и ванадия в чугун и низкое содержание их в шлаке. Увеличение расхода ферромарганца более 3% практически не улучшает качество шлака. Химический анализ полученного шлака показал, что содержание V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> снизилось до 0,09% и 1,1%, соответственно, при < 3% оксида железа. При выплавке БТШ достигнуты следующие результаты:

- на 11,5 % повышается содержание  $TiO_2$  в шлаке;
- обеспечивается более полное извлечение хрома (до 70%) и ванадия (до 87%) в попутный металл и низкое содержание их в товарном шлаке.

Касательно получения стандартного ферротитана с применением более дешевого восстановителя ФСА ( $Si+Al=80\%$ ), то в опытно-промышленном масштабе на руднотермической печи рафинировочного типа мощностью 0,1 МВ·А были проведены испытания и получены положительные результаты. Химический состав ферротитана соответствует маркам ФТи25 и ФТи35С8 (ГОСТ 4761-91).

При выплавке низкопроцентного ферротитана из ильменитового концентрата использование в качестве восстановителя кремний-алюмосодержащего комплексного сплава (ФСА) позволяет снизить угар и расход алюминия на 50% и повысить его полезное действие, вследствие того, что алюминий присутствует в составе ФСА в виде химических соединений с кремнием и железом. Кроме того, ФСА, содержит  $Si > 55\%$ , это позволяет повысить извлечение титана, за счет образования прочного (чем алюминид) силицида типа  $Ti_5Si_3$ .

Применение комплексного восстановителя изменяет состав конечных шлаков. В результате окисления кремния и алюминия в процессе восстановления образуется муллит ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), последний повышает активность  $TiO_2$  в шлаке и одновременно способствует повышению извлечения титана в сплав, а также снижает вероятность образования соединения типа тиалит ( $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ ). Наряду с положительным воздействием  $SiO_2$  на активность  $TiO_2$  в шлаке, диоксид кремния также снижает температуру процесса получения ферротитана, способствуя созданию благоприятных условий для осаждения корольков металла.

**Закключение.** Из приведенных теоретических данных следует подтверждение того факта, что ТДА при котором пренебрегается сложный математический аппарат, позволяет с помощью диаграмм фазового строения многокомпонентных систем прогнозировать оптимальные области составов более технологичных шлаков.

### Список литературы

- 1 Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 544 с
- 2 Гриненко В.И., Петлюх П.С., Есенжулов А.Б. О кристаллохимической стабилизации шлаков рафинированного феррохрома // Мат-лы научн.-техн. конф. «Экологическая безопасность Урала». – Екатеринбург, 2002. – С. 182-183.
- 3 Пат.2251586 РФ. Способ получения ферросиликоалюминия в

рудно-термической печи/ Байсанов С.О., Толымбеков М.Ж. опубл.; 15.03.96 г., Бюл. №1.

4 С.О. Байсанов, Н.З. Нургали, М.С. Алмагамбетов. «Математическое моделирование диаграммы фазового состава  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ » // Научно-технический журнал «Промышленность Казахстана», 2008г. - №4(49). - С.75-77.

5 Предпатент 19055 РК. Способ выплавки рафинированного феррохро-ма/ С.О. Байсанов, М.Ж. Толымбеков, М.С. Алмагамбетов и др.; опубл. 15.01.08 г., бюл. №1.

6 Нургали Н.З., Байсанов С.О., Алмагамбетов М.С., Бухарицын В.О. Некоторые свойства ильменитовых концентратов Шокашского месторождения. // Респуб. научный журнал «Технология производства металлов и вторичных материалов», 2006г. - №2(10). - С. 19-23

7 С.О. Байсанов, Н.З. Нургали, М.С. Алмагамбетов. «Термодинамически-диаграммное исследование подсистем расплавов системы  $\text{TiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ » // Научно-технический сборник НЦ НТИ «Новости науки Казахстана», 2008г. - №3(98). - С. 17-22

8 Предпатент № 16839 РК. Способ выплавки титанового шлака / Байсанов С.О., Нургали Н.З., Толымбеков М.Ж. и др.; / опубл. 16.01.2006г. бюлл. №1.

**Нургали Н.З.**, кандидат технических наук, e-mail: n.nurgali@yandex.kz

**Алмагамбетов М.С.**, кандидат технических наук,

e-mail: iic-aktobe@mail.ru

**Байсанов А.С.**, кандидат технических наук

**Жумагалиев Е.У.**, технических наук, e-mail: erlan\_zhumagaliev@mail.ru

**Келаманов Б.С.**, кандидат технических наук,

e-mail: b-kelamanov@mail.ru