

**Раздел 1. «Металлургия»**

МРНТИ 53.37.29

А.А. Ильин, Н.Н. Зобнин, И.А. Пикалова, Н.В. Немчинова

*Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Республика Казахстан,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск,  
Российская Федерация  
(E-mail: [zobninnn@mail.ru](mailto:zobninnn@mail.ru))*

**Экспериментальное изучение эффективности применения колеманита и уллексита в процессе плавки металлургического кремния**

В статье определены ключевые источники поступления в кремний металл примесей железа и бора в условиях промышленной плавки в SAF. Рентгено - флуоресцентным методом изучены примесные горные породы в составе кварца - основного сырья для производства кремния металла, проведена их визуальная классификация. Установлено, что энергия вторичного характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) для бора и железа, содержащегося в исходном сырье - 3,1 и 6,3 кэВ соответственно. Найдена взаимосвязь между интенсивностью импульсов ХРИ и концентрацией примеси железа и бора. Установлены особенности распределения этих элементов между металлургическими фазами (кремнием металлом, шлаком и газовой фазой) при использовании в процессе плавки с применением боратового флюса (колеманит) и без него. В промышленных условиях установлено, что коэффициент перехода бора в кремний металл сокращается при использовании боратового флюса с 76,3% до 58,36%. Переход железа в кремний металл из шихты остаётся на одном уровне с незначительной тенденцией к снижению с 93,18% до 92,12%. Это, возможно, объясняется сокращением времени контакта накапливающегося на подине расплава шлака с жидким кремнием металлом. Также отмечается сокращение расхода шихтовых материалов при использовании колеманита с 6,07 до 5,635 т/т кремния металла за счёт сокращения времени периодов очистки плавильной ванны от накопленного на подине вязкого шлака.

*Ключевые слова:* Кремний металл, плавка, баланс Fe, B, кварц, характеристическое рентгеновское излучение, боратовый флюс, колеманит, уллексит

*Введение*

Добавка боратовой руды в качестве флюса при выплавке кремния металла может помочь сократить проблему вязкого оксидного силикатного расплава в процессе тапинга расплава из SAF в промышленности. Это связано со способностью оксида бора к деполимеризации структурных единиц силикатной сетки. Данный эффект был ранее изучен методом Рамановской спектроскопии процессов структурной модификации соответствующих оксидных расплавов [1]. Однако с другой стороны бор наряду с железом - вредная примесь, которая снижает качество готового продукта – кремния металла и кремния солнечного качества. Есть много исследований, которые изучают возможность удаления бора и железа из кремния металла [2,3]. В этой связи может возникнуть сомнение в целесообразности использования боратовой руды при выплавке кремния металла. Есть опасность перехода бора из боратовой руды в кремний металл. Проводилось изучение коэффициента распределения бора между кремнием металлом и шлаком в восстановительных условиях [4]. Результаты показывают принципиальную возможность блокирования восстановления бора в процессе плавки. Однако эти данные получены только в лабораторных условиях и возможность блокировки восстановления бора необходимо проверить в промышленных условиях. В любом случае необходимо изучить особенности примесей в сырье и предполагаемых флюсах для плавки кремния металла, чтобы оценить возможность блокирования восстановления бора и сокращение доли железа различными методами.

**Раздел 1. «Металлургия»**

Данные работы проводились разными исследователями, но пока эти методы трудно применить в промышленных масштабах [5-9].

*Методы и материалы*

Для изучения рентгенометрических свойств кварца использовали следующее оборудование. X-Ray diffraction, analyses were performed on a Philips powder diffractometer employing CuK $\alpha$  radiation (40 kV, 30 mA) in the range  $2\theta = 10-70^\circ$  at a goniometer rate of  $2\theta = 2^\circ/\text{min}$ . For analyzed for SiO $_2$  and Fe $_2$ O $_3$  content using XRF (X-ray Fluorescence) spectrometry ARL PERFORM $^X$ .

Для оценки энергии и интенсивности импульсов вторичного излучения CXR – Characteristic X-ray использовали систему с чувствительной измерительной системой с полупроводниковыми детекторами отраженного рентгеновского излучения. Схема движения сигналов, принципиальная схема работы этого оборудования представлена на рисунке 1.

Борсодержащие материалы для исследования представлены Ab Etiprjducts OU (Финляндия). Рентгенофазовый анализ борсодержащих материалов и шлаков проводили на дифрактометре ДРОН-2.0. Идентификацию дифракционных максимумов проводили с использованием банка данных ICPDS. Результаты химического анализа борсодержащих материалов представлены в таблице 1.

Промышленные эксперименты проводили в условиях ТОО «Tau-Ken Temir» на технологическом оборудовании и методом, описанном нами ранее [10]. В базовом варианте проводили плавку кремния металла без использования боратового флюса, а экспериментальном варианте с применением флюса.

Таблица 1. Химический состав борсодержащих материалов

Материал	Содержание, %							Температура начала кристаллизации, °C
	B $_2$ O $_3$	CaO	MgO	SiO $_2$	Al $_2$ O $_3$	Na $_2$ O	влага	
Колеманит	38,78	27,9	3,60	5,63	0,69	-	23,40	1004
Улексит	35,98	18,9	4,95	4,95	0,23	5,52	29,47	940

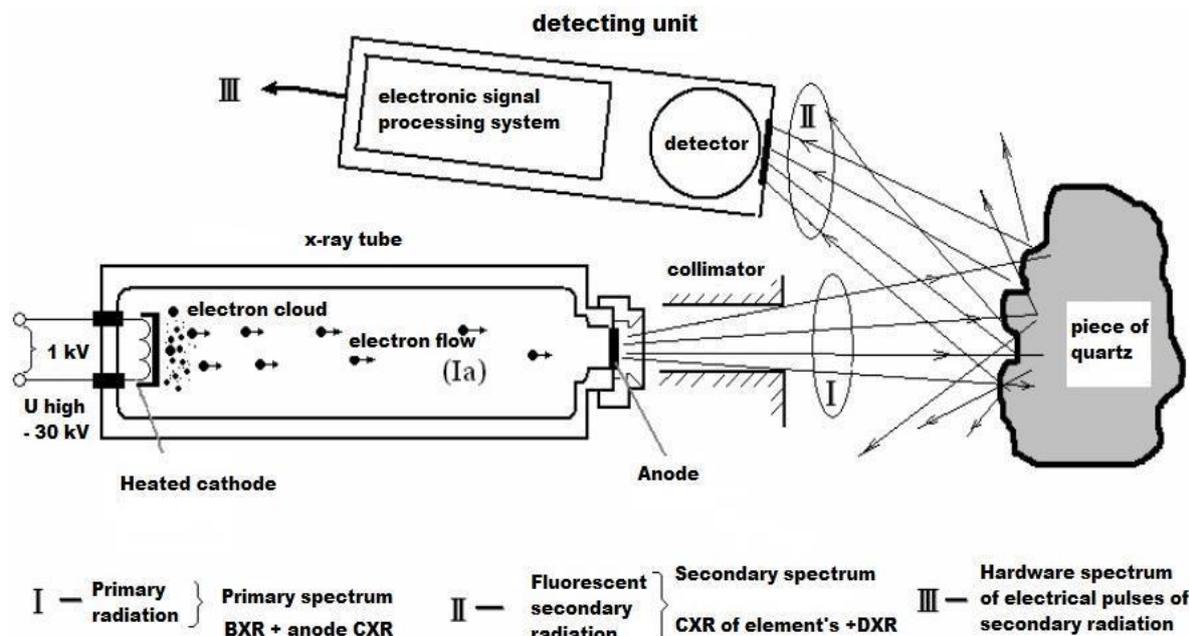


Рисунок 1. Принципиальная схема движения сигналов при изучении рентгенометрических свойств, BXR – Brake X-ray, CXR – Characteristic X-ray, DXR – Diffuse X-ray

## Раздел 1. «Металлургия»

### Результаты и обсуждение

Для исследования рентгенометрических свойств использовали кварц месторождения Актас (Казахстан). В настоящий момент процесс добычи кварца не обеспечивает исключение примесной горной породы. В процессе визуального изучения кварца были выявлены 5 групп загрязнений (примесных пород): «черный» кварц рисунок 2, «железистый» кварц рисунок 3, гранит рисунок 4, «рубиновый» кварц – рисунок 6, «бордовый» кварц – рисунок 7. Основная масса кварца на рисунке 5. Химический состав всех горных пород приведен в таблице 2.

На рисунке 8 представлена зависимость количества импульсов отраженного рентгеновского излучения за период измерения от его энергии, кэВ. Как видно из графика энергия вторичного характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) для бора и железа, содержащегося в исходном сырье - 3,1 и 6,3 кэВ соответственно.

Имеется хорошая корреляция величины пика в районе энергии характеристического рентгеновского излучения железа и бора от концентрации этих элементов в кварце, что в дальнейшем можно будет использовать для отделения вредных примесей из сырья методом рентгенометрической сепарации. Зависимости интенсивности импульсов характеристического вторичного рентгеновского излучения образцов кварца от концентрации железа и бора представлены на рисунках 9 и 10.

Таблица 2. Химический состав разновидностей кварца

Наименование	Химический состав, %					
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Основная масса кварца	0,02	0,14	0,003	0,003	0,0006	99,8334
Гранит	0,62	5,46	0,108	0,026	0,0118	93,7742
«Железистый» кварц	1,23	0,16	0,011	0,005	0,0385	98,5555
«Черный» кварц	5,92	3,83	0,129	0,146	0,1152	89,8598
«Рубиновый»	0,28	0,08	0,003	0,004	0,0023	99,6307
«Бордовый»	24,01	0,19	0,028	0,017	0,2355	75,5195



Рисунок 2. «Черный» кварц



Рисунок 3. «Железистый» кварц

**Раздел 1. «Металлургия»**



Рисунок 4. Гранит



Рисунок 5. Основная масса кварца



Рисунок 6. «Рубиновый» кварц



Рисунок 7. «Бордовый» кварц

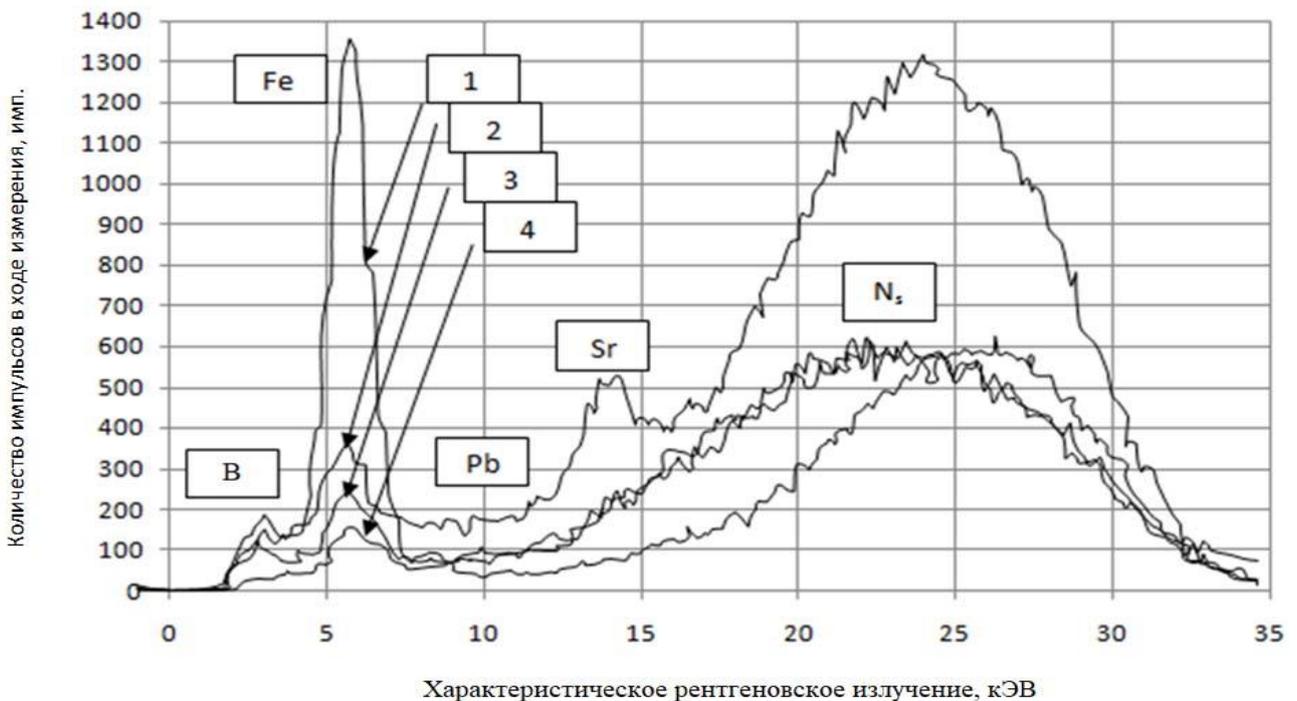


Рисунок 8. Зависимость количества импульсов отраженного рентгеновского излучения за период измерения от энергии излучения, кЭВ (1 – «Черный» кварц, 2 – «Железистый» кварц, 3 – Гранит, 4 – «Рубиновый» кварц), где  $N_s$  – вторичное рассеянное рентгеновское излучение, регистрируемое от куска сырья вместе с характеристическим излучением элементов

### Раздел 1. «Металлургия»

Также следует отметить, что существует корреляция между содержанием железа и бора в образцах рисунок 11, что говорит об некоторой вещественной взаимосвязи и, возможности наличия комплексных соединений с участием этих элементов в образцах как на уровне экзогенных включений, так и на уровне встраивания в кристаллические структуры.

Базовый период проведения промышленных исследований характеризовался наличием шлакообразующих примесей в составе сырьевых материалов. Это приводило к образованию незначительных количеств (3-6%) шлакового расплава в ванне печи. Для стабильности работы были приложены все усилия к тому, чтобы эти шлаки в полной мере были удалены при тапинге расплава. Шлак (55-60 кг на 1 тонну кремния) высококремнистый с достаточно высокой температурой плавления и вязкостью. Фактическая плотность шлака 2,5-2,8 кг/м<sup>3</sup> превышает или на уровне кремния 2,4-2,6 кг/м<sup>3</sup>. То есть расплав шлака несколько тяжелее расплава кремния, поэтому происходит его постепенное накопление под слоем жидкого кремния.

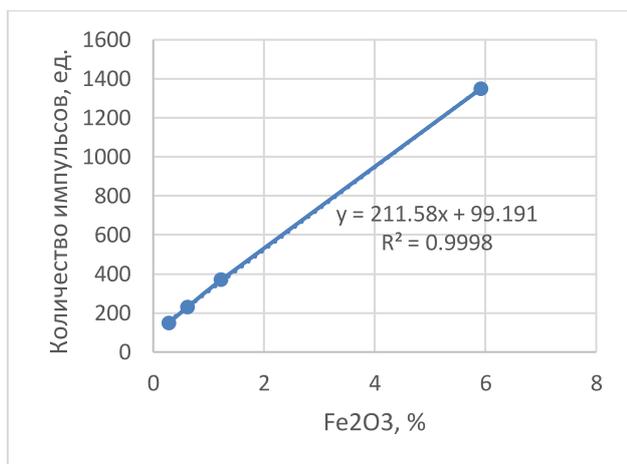
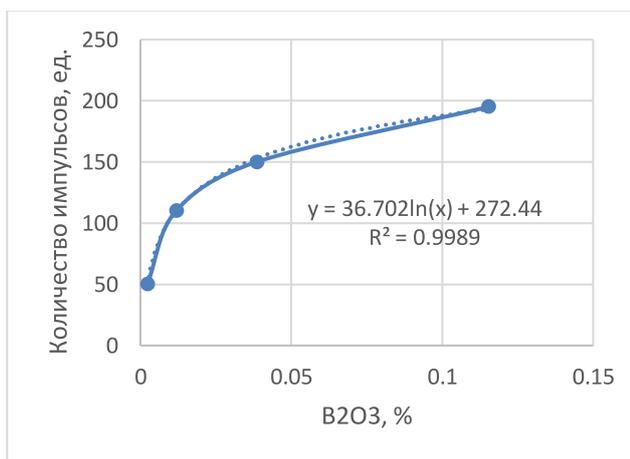


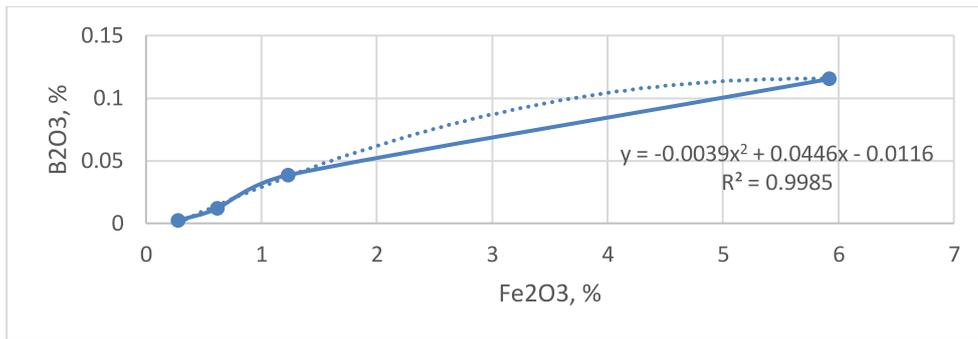
Рисунок 9. Зависимость интенсивности ХРИ (Fe) от %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в образце кварца

Рисунок 9. Зависимость интенсивности ХРИ (В) от %, В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в образце кварца

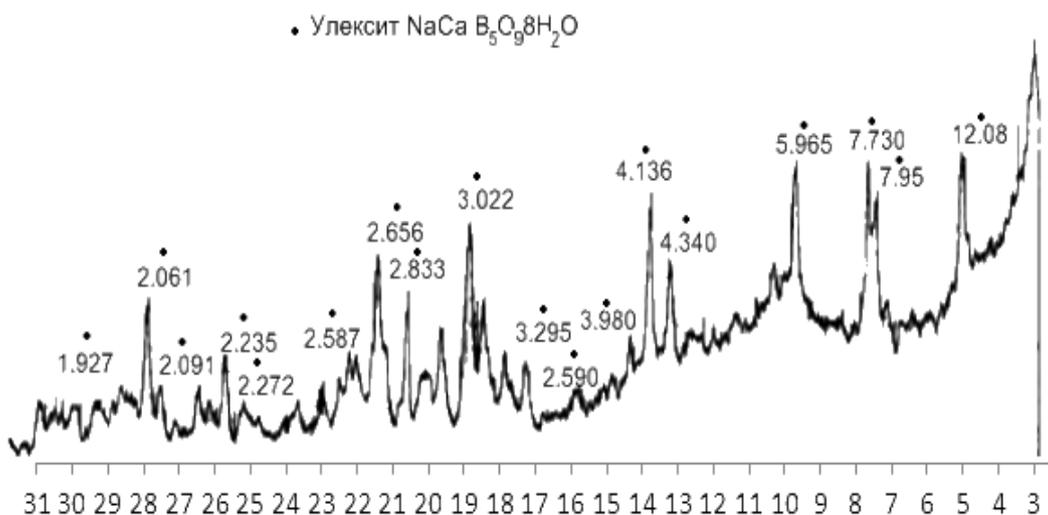


**Раздел 1. «Металлургия»**

Рисунок 11. Связь %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в образце кварца



Результаты рентгенофазового анализа борсодержащих материалов представлены на рисунке 12. В борсодержащих материалах идентифицированы только основные минералы: улексит и колеманит. Химический состав шлака: SiO<sub>2</sub> – 75-80%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5-7%; CaO – 11-15%. Температура плавления шлака около 1500°C. Содержание карбида кремния в шлаке может достигать 10-30%, что существенно увеличивает температуру плавления (более 1600°C) и вязкость. Накопление тугоплавкого и вязкого шлака на подине ванны печи способствует переходу реакционной зоны в средние горизонты ванны, что, по сути, и наблюдается в реальности. Легкоплавкий расплавленный кремний вследствие низкой плотности при этом располагается поверх шлака. Поэтому на выпусках наблюдается низкая активность сливаемого кремния, которой скорее просачивается сквозь шлаковый расплав. В базовом периоде без добавок борсодержащих флюсов периодически проводились проплавки ванны печи для удаления накопленного на подине шлака. При этом ограничивались или полностью исключались подачи шихты в ванну. Тигли раскрыты, восстанавливающийся кремний возгонялся. При этом появлялась возможность прогрева шлакового расплава, который периодически сливается. На время проплавки выход кремния снижается или полностью прекращается вследствие его возгонки в газовую фазу. Без этого проплавка невозможна, так как на поверхности шлака будет находиться кремний, который не даст возможности прогреть шлак. Поэтому этот кремний приходится перегревать выше нормы.



**Раздел 1. «Металлургия»**

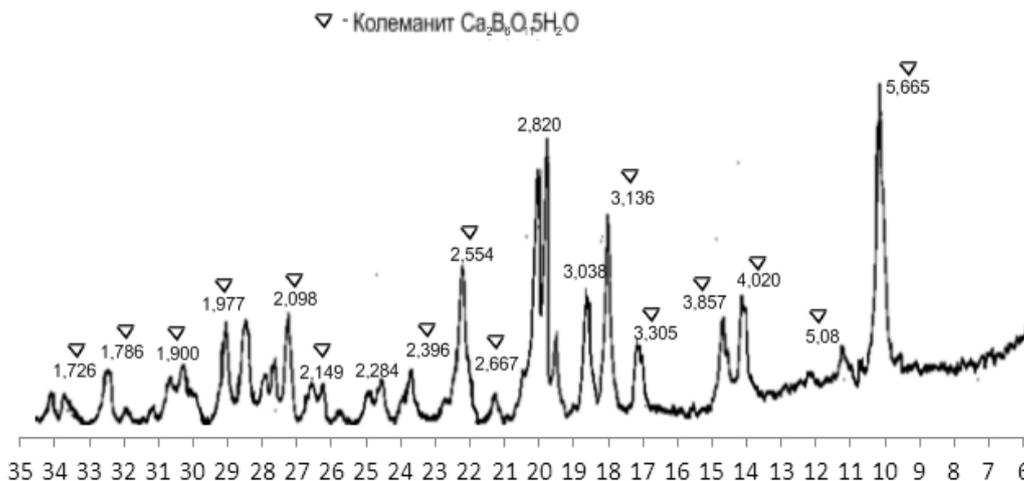


Рисунок 12. Рентгенограммы исходных борсодержащих материалов

Таблица 3. Материальный баланс железа и бора в базовом периоде выплавки кремния металла

Сырьё							
Материал	Расходная норма, т/т	В, %	Приход В		Fe, %	Приход Fe	
			кг	%		кг	%
Кварц	3,20	0,0006	0,0192	1,81	0,120	3,840	63,63
Древесный уголь	0,64	0,0722	0,4620	43,50	0,041	0,256	4,24
Уголь	0,93	0,0158	0,1469	13,83	0,122	1,116	18,49
Полукокс	0,35	0,0298	0,1043	9,82	0,221	0,770	12,76
Графитовый электрод	0,11	0,1523	0,1675	15,77	0,010	0,011	0,18
Древесная щепа	0,84	0,0193	0,1621	15,26	0,005	0,042	0,70
Всего	6,07		1,0621			6,035	
Продукты плавки							
Материал	Расходная норма, т/т	В, %	Выход В		Fe, %	Выход Fe	
			кг	%		кг	%
Кремний металл	1,0000	0,0810	0,8104	76,3	0,5622	5,622	93,18
Шлак	0,0885	0,2376	0,2102	19,8	0,2727	0,241	4,00
Микросилика	1,2138	0,0033	0,0410	3,9	0,0140	0,170	2,82
Всего	2,3023		1,0617			6,033	

Это приводило к его вторичному окислению воздухом через открытые газовые полости с последующей возгонкой в виде монооксида кремния. Продолжительность проплавки в случаях сильного шлакования подины достигала 24 часов для достаточно полного очищения ванны печи от шлака. На время проплавки снижали токовую нагрузку и повышали напряжение на ванне. Недостатком этого способа является повышение температуры технологических газов, удаляемых в газоочистку, а также повышенная тепловая нагрузка на элементы короткой сети. Для сокращения времени проплавления или полного исключения необходимости данной технологической операции проведен экспериментальный период в работе печи с использованием борсодержащего флюса для очистки ванны - колеманита. Визуальное наблюдение за процессом плавки показало, что использование колеманита при выплавке кремния металла влияет положительно, а именно,

**Раздел 1. «Металлургия»**

наблюдается расширение ванны печи, тапинг протекает без затруднений. Добавка колеманита проявила себя как легкоплавкая смесь и ванна печи была в нормальном состоянии.

Таблица 4. Материальный баланс железа и бора в экспериментальном периоде выплавки кремния металла

Сырьё							
Материал	Расходная норма, т/т	В, %	Приход В		Fe, %	Приход Fe	
			кг	%		кг	кг
Кварц	3,051	0,0007	0,0214	1,73	0,10	3,0510	60,63
Древесный уголь	0,595	0,0699	0,4159	33,66	0,03	0,1785	3,55
Уголь	0,88	0,0163	0,1434	11,61	0,14	1,2320	24,48
Полукокс	0,248	0,0311	0,0771	6,24	0,21	0,5208	10,35
Графитовый электрод	0,088	0,1877	0,1652	13,37	0,02	0,0176	0,35
Древесная щепа	0,771	0,0223	0,1719	13,91	0,002	0,0154	0,31
Всего	0,002	12,035	0,2407	19,48	0,86	0,0172	0,34
Кварц	5,635		1,2356			5,0325	
Продукты плавки							
Материал	Расходная норма, т/т	В, %	Выход В		Fe, %	Выход Fe	
			кг	%		кг	кг
Кремний металл	1,0000	0,0721	0,7210	58,36	0,464	4,640	92,12
Шлак	0,0922	0,5228	0,4820	39,02	0,267	0,246	4,89
Микросилика	1,0052	0,00322	0,0324	2,62	0,015	0,151	2,99
Всего	2,0974		1,2354			5,037	

В таблице 3 и 4 представлен баланс железа и бора в ходе базового и экспериментального периода работы печи соответственно. Продолжительность каждого из периодов составил 3 месяца. Как видно из сравнения балансов базового и экспериментального периодов, введение колеманита в незначительных количествах, около 2 кг/т кремния металла обеспечило сокращение расхода шихтовых материалов на тонну готовой продукции. Так если в базовом периоде для производства 1 тонны кремния металла требовалось 6,07 тонн шихты, то при добавке колеманита расход сократился до 5,635 тонн. Это можно объяснить тем, что в базовом периоде было проведено около 10 проплавов с целью очистки плавильной ванны от накопленного шлака. Во время этих операций происходило сильное испарение кремния в виде монооксида и выгорание углеродистых материалов. При этом не происходило накопление кремния металла, т.к. все полезные компоненты переходили в газовую фазу и покидали печь в виде пыли (микросилики). Это подтверждается тем, что в базовом периоде количество микросилики было значительно больше, чем в экспериментальном – 1,2138 т/т и 1,0052 т/т кремния металла соответственно. В экспериментальном периоде операции проплава были полностью исключены. В моменты, когда по внешним признакам в печи накапливалось критическое количество шлака, после очередного тапинга газовые полости возле электродов вскрывали и давали под электроды от 50 до 200 кг колеманита. Количество колеманита определяли в зависимости от степени ошлакования плавильной ванны. Чем больше признаков, таких как сложности при тапинге, низкая температура кремния металла и т.д., тем больше количество колеманита.

Несмотря на то, что колеманит содержит бора много больше, чем другие компоненты шихты, приход элементарного бора на тонну готовой продукции увеличился незначительно – 1,062 кг/т и 1,235 кг/т для базового и экспериментального периода соответственно. Это стало возможным за счёт того, что расход колеманита очень мал. Не большое увеличение прихода бора было обеспечено также тем, что сократился расход других шихтовых материалов (древесный уголь, щепа и т.д.), которые также являются источниками бора.

## Раздел 1. «Металлургия»

Следует особо отметить, что введение колеманита обеспечило сокращение степени перехода бора в кремний металл с 76,3% до 58,36% в базовом и экспериментальном периодах соответственно. При этом коэффициент распределения бора,  $L_B = W_{(B)}/W_{[B]}$  составил для базового периода 0,259 и для экспериментального периода 0,668. Эти данные согласуются с данными, представленными в литературе [4]. Следует отметить, что авторами достигнуты значительно лучшие результаты в этом плане. Так первоначально они получили коэффициент распределения бора на уровне 0,206 при выдержке 0,6 часа с применением мастер шлака с составом:  $SiO_2$  – 63,2%; CaO – 36,3%. Через 3 часа выдержки кремния металла над мастер шлаком  $L_B$  увеличился до 1,649 и до 2,138 при выдержке 9 часов [4]. Однако в условиях промышленного производства нет возможности обеспечить такую большую продолжительность выдержки. Реалистичное значение 0,50-0,75 часа. Кроме того, в промышленных условиях для увеличения содержания CaO в шлаке до 35-40% нужно существенно увеличить расход извести в шихту. Это может привести к загрязнению кремния металла кальцием и далее необходимости увеличению времени продувки в процессе окислительного рафинирования. Увеличение времени продувки, обычно, приводит к повышенной потере кремния в результате окисления.

В наших условиях концентрация бора в кремний металле незначительно снизилась с 0,081% до 0,0721% в базовом и экспериментальном периоде соответственно. Полученный результат на первый взгляд парадоксален. Мы ожидали, что при введении колеманита концентрация бора в кремний металле увеличится. В реальности получилось, наоборот. Логически этот факт можно объяснить тем, что в базовом периоде шлак накапливался в печи и продолжительное время контактировал с жидким кремнием металлов. При этом кремний металл насыщался примесями. В том числе и бором. При введении колеманита шлак не накапливался, оперативно покидал печь и время контакта шлака с кремнием металлом значительно сократилось. За счёт этого переход примесей из шлака в кремний металл был ограничен. Это косвенно подтверждается увеличением концентрации бора в шлаке с 0,2376% до 0,5228% в базовом и экспериментальном периоде соответственно.

Распределение железа практически не изменилось при введении колеманита в состав шихты. Можно отметить незначительное увеличение перехода железа в шлак с 4,0% до 4,89%. Возможно, это также связано с сокращением времени контакта жидких расплавов шлака и кремния металла на подине печи.

Эксперименты были проведены только с использованием колеманита в силу организационных возможностей. По мере возможности будут также проведены эксперименты с использованием в качестве борсодержащего флюса улексита.

### Выводы

Проведена визуальная классификация примесных горных пород в составе кварца. Определены рентгенографические особенности шихтовых материалов для производства кремния металла. Установлено, что энергия вторичного характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) для бора и железа, содержащегося в исходном сырье - 3,1 и 6,3 кэВ соответственно. Установлена корреляция между интенсивностью импульсов ХРИ и концентрацией примеси железа и бора. В промышленных условиях установлены особенности перехода примесных элементов в кремний металл при использовании в процессе плавки боратового флюса (колеманит) и без него. Обнаружено, что коэффициент перехода бора в кремний металл сокращается при использовании колеманита с 76,3% до 58,36%. Переход железа в кремний металл из шихты остаётся на одном уровне с незначительной тенденцией к снижению с 93,18% до 92,12%. Это, вероятно, можно объяснить снижением времени контакта накапливающегося на подине расплава шлака с жидким кремнием металлом. Добавка борсодержащего флюса обеспечивает сокращение расхода шихтовых материалов при использовании колеманита с 6,07 до 5,635 т/т кремния металла за счёт сокращения времени периодов очистки плавильной ванны от накопленного на подине вязкого шлака. Концентрация примеси бора и железа в кремний металле при этом сокращается. Печь работает в нормальном режиме. Нет трудностей при тапинге, снижается количество пылегазовых выбросов.

**Раздел 1. «Металлургия»***Список литературы*

1. Jeff Kline, Merete Tangstad, Gabriella Tranell, A Raman spectroscopic study of the structural modifications associated with the addition of calcium oxide and boron oxide to silica. DOI: 10.1007/s11663-014-0194-9 The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International. 2014, Volume 46B, pp.62-73
2. Chenghao Lu, Tianyu Tang, Zhilin Sheng, Pengfei Xing, Xuetao Luo, Improved removal of boron from metallurgical-grade Si by CaO-SiO<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub> slag refining with intermittent CaCl<sub>2</sub> addition. Vacuum. 2017, Volume 143, pp.7-13
3. Zhao Ding, Wenhui Ma, Kuixian Wei, Jijun Wu, Yang Zhou, Keqiang Xie, Boron removal from metallurgical-grade silicon using lithium containing slag. Journal of Non-Crystalline Solids. 2012, Volume 358, pp. 2708–2712
4. Lars Klemet Jakobsson, Merete Tangstad, Distribution of Boron Between Silicon and CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Slags. Metallurgical And Materials Transactions B. 2014, Volume, 45B, pp.1644-1655
5. Ben, F.M., Gallala, W., Abdeljaouad, S., Quartz sand beneficiation using magnetic and electrostatic separation to glass industries. Journal of New Technology and Materials JNTM. 2016, Volume 06, No.01, 60-72
6. Deniz, A.F., Abakay, T.H., Bozkurt, V., Removal of Impurities from Tailing (Quartz) Obtained from Bitlis Kyanite Ore by Flotation Method. International Journal of Applied Science and Technology. 2011, Vol. 1, No.1, 74-81
7. Hacifazlioglu, H., Enrichment of silica sand ore by cyclojet flotation cell. Separation Science and Technology. 2014, Vol. 49, 1623-1632.
8. Soufiane, B., Mohamed. B., Abde, S.C., Removal of iron from sandstone by magnetic separation and leaching: case of El-aouana deposit (Algeria). Mining Science. 2015, Vol. 22, 33–44
9. Tuncuk, A., Akcil, A., Removal of iron from quartz ore using different acids a laboratory-scale reactor study. Mineral Processing & Extractive Metall. Rev. 2014, Vol. 35, No. 4, 217-228
10. Zobnin N. N.; Torgovets A. K.; Pikalova I. A.; Yussupova Y. S.; Atakishiyev S. A., Influence of thermal stability of quartz and the particle size distribution of burden materials on the process of smelting of electro thermal metallurgical silicon. ORIENTAL JOURNAL OF CHEMISTRY. 2018, Vol. 34, no. (2), 1120-1125, <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/340265>

Ильин А.А., Зобнин Н.Н., Пикалова И.А., Немчинова Н.В.

**Металлургиялық кремнийді балқыту процесінде колеманит пен улекситті қолданудың тиімділігін эксперименттік зерттеу**

Мақалада saf-та өнеркәсіптік балқыту жағдайында темір мен бор қоспаларының кремний металына түсуінің негізгі көздері анықталған. Рентген - флуоресцентті әдіспен кремний металын өндіруге арналған негізгі шикізат-кварц құрамындағы қоспалы жыныстар зерттелді, олардың визуалды жіктелуі жүргізілді. Бастапқы шикізат құрамындағы бор мен темір үшін қайталама сипаттамалық рентген сәулесінің (ХРИ) энергиясы сәйкесінше 3,1 және 6,3 кэВ болатындығы анықталды. ХРИ импульстарының қарқындылығы мен темір мен бор қоспасының концентрациясы арасында байланыс табылды. Бұл элементтердің металлургиялық фазалар (кремний металы, қож және газ фазасы) арасында Борат ағынын (колеманит) қолдана отырып және онсыз балқыту процесінде қолдану кезінде таралу ерекшеліктері анықталды. Өнеркәсіптік жағдайда бордың кремний металына ауысу коэффициенті Борат ағынын пайдалану кезінде 76,3% - дан 58,36% - ға дейін төмендейтіні анықталды. Темірдің шихтадан кремний металына ауысуы 93,18% - дан 92,12% - ға дейін төмендеу тенденциясымен бір деңгейде қалады. Бұл балқыманың түбінде жиналатын шлақтың сұйық кремний металымен жанасу уақытының қысқаруымен түсіндірілуі мүмкін. Сондай-ақ, колеманитті пайдаланған кезде шихта материалдарының шығынын 6,07-ден 5,635 т/т металл кремнийіне дейін балқыту

**Раздел 1. «Металлургия»**

ваннасын подинде жинақталған тұтқыр шлактан тазарту кезеңдерінің уақытын қысқарту есебінен қысқарту байқалады.

*Түйін сөздер:* Кремний металы, балқыту, Fe, B балансы, кварц, сипаттамалық рентген сәулелері, Борат ағыны, колеманит, улексит.

A.A. Ilyin, N.N. Zobnin, I.A. Pikalova, N.V. Nemchinova

**Experimental study of the effectiveness of the use of colemanite and ulexite in the smelting process of metallurgical silicon**

The article identifies the key sources of iron and boron impurities entering silicon metal in the conditions of industrial melting in saf. the x-ray fluorescence method was used to study impurity rocks in the composition of quartz, the main raw material for the production of silicon metal, and their visual classification was carried out. it has been established that the energy of secondary characteristic x-ray radiation (xri) for boron and iron contained in the feedstock is 3.1 and 6.3 keV, respectively. the relationship between the intensity of the xri pulses and the concentration of iron and boron impurities has been found. the peculiarities of the distribution of these elements between metallurgical phases (silicon metal, slag and gas phase) when used in the melting process with and without borate flux (colemanite) have been established. in industrial conditions, it was found that the transition coefficient of boron to silicon metal decreases with the use of borate flux from 76.3% to 58.36%. the transition of iron to silicon metal from the charge remains at the same level with a slight downward trend from 93.18% to 92.12%. this may be due to a reduction in the contact time of the slag accumulating on the substrate of the melt with liquid silicon metal. there is also a reduction in the consumption of charge materials when using colemanite from 6.07 to 5.635 t/t of silicon metal due to a reduction in the time periods for cleaning the melting bath from the viscous slag accumulated on the hearth.

List of literature

1. Jeff Kline, Merete Tangstad, Gabriella Tranell, A Raman spectroscopic study of the structural modifications associated with the addition of calcium oxide and boron oxide to silica. DOI: 10.1007/s11663-014-0194-9 The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International. 2014, Volume 46B, pp.62-73
2. Chenghao Lu, Tianyu Tang, Zhilin Sheng, Pengfei Xing, Xuetao Luo, Improved removal of boron from metallurgical-grade Si by CaO-SiO<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub> slag refining with intermittent CaCl<sub>2</sub> addition. Vacuum. 2017, Volume 143, pp.7-13
3. Zhao Ding, Wenhui Ma, Kuixian Wei, Jijun Wu, Yang Zhou, Keqiang Xie, Boron removal from metallurgical-grade silicon using lithium containing slag. Journal of Non-Crystalline Solids. 2012, Volume 358, pp. 2708–2712
4. Lars Klemet Jakobsson, Merete Tangstad, Distribution of Boron Between Silicon and CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Slags. Metallurgical And Materials Transactions B. 2014, Volume, 45B, pp.1644-1655
5. Ben, F.M., Gallala, W., Abdeljaouad, S., Quartz sand beneficiation using magnetic and electrostatic separation to glass industries. Journal of New Technology and Materials JNTM. 2016, Volume 06, No.01, 60-72
6. Deniz, A.F., Abakay, T.H., Bozkurt, V., Removal of Impurities from Tailing (Quartz) Obtained from Bitlis Kyanite Ore by Flotation Method. International Journal of Applied Science and Technology. 2011, Vol. 1, No.1, 74-81
7. Hacifazlioglu, H., Enrichment of silica sand ore by cyclojet flotation cell. Separation Science and Technology. 2014, Vol. 49, 1623-1632.

**Раздел 1. «Металлургия»**

8. Soufiane, B., Mohamed. B., Abde, S.C., Removal of iron from sandstone by magnetic separation and leaching: case of El-aouana deposit (Algeria). *Mining Science*. 2015, *Vol. 22*, 33–44
9. Tuncuk, A., Akcil, A., Removal of iron from quartz ore using different acids a laboratory-scale reactor study. *Mineral Processing & Extractive Metall. Rev.* 2014, *Vol. 35, No. 4*, 217-228
10. Zobnin N. N.; Torgovets A. K.; Pikalova I. A.; Yussupova Y. S.; Atakishiyev S. A., Influence of thermal stability of quartz and the particle size distribution of burden materials on the process of smelting of electro thermal metallurgical silicon. *ORIENTAL JOURNAL OF CHEMISTRY*. 2018, *Vol. 34, no. (2)*, 1120-1125, <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/340265>