

А. З. ИСАГУЛОВ<sup>1</sup>, С. О. БАЙСАНОВ<sup>2</sup>, А. С. БАЙСАНОВ<sup>2</sup>,  
А. АЗОТТЕ<sup>3</sup>, Е. Ж. ШАБАНОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский государственный технический университет, Караганда,  
\*ye.shabanov@gmail.com

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

<sup>3</sup>Университет Лотарингии, Мец, Франция

## РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНОГО СПЛАВА АЛЮМОСИЛИКОХРОМА

В статье приводятся результаты исследований по определению фазового состава и структуры комплексного сплава алюмосиликохрома, полученные с помощью рентгенофазового (РФА) и металлографического анализов. Анализ структуры отшлифованных поверхностей с использованием сканирующего электронного микроскопа показал многообразную картину структуры сплава. Структура алюмосиликохрома представлена крупными образованиями в виде полос и пластин, которыми являются кристаллы чистого кремния, эвтектика Al-Si-Cr-Fe и интерметаллические соединения  $(\text{Fe}, \text{Cr})\text{Al}_3\text{Si}_2$ ,  $(\text{Fe}, \text{Cr})\text{Si}_2$ ,  $\text{Ti}_x\text{Cr}_y\text{Si}_z$ . Содержание углерода в карбидной фазе находится в пределах 29,82-34,49 %, что приблизительно соответствует соединению  $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ . Установлена неравномерность распределения компонентов по объему исследуемого образца, которая объясняется процессами ликвации и скоростью кристаллизации в период затвердевания слитка металла. Сопоставление данных РФА и металлографического анализов с результатами термодинамически-диаграммного анализа (ТДА) подтвердило применимость последнего в прогнозировании и изучении динамики изменения фазовых превращений, происходящих в промежуточных и конечных продуктах металлургического передела. Так, проведенным ранее ТДА металлической системы Cr-Fe-Al-Si установлено, что в составе алюмосиликохрома преобладающими фазами являются соединения Si,  $\text{FeSi}_2$ , Al и  $\text{CrSi}_2$ , а также продукты распада этих соединений. По данным рентгенофазового анализа наиболее ярко выраженными фазами в сплаве являются структурно-свободный кремний ( $\text{Si}_{\text{мет}}$ ) и фазы SiC, FeCr,  $\text{CrSi}_2$ , что соответствует результатам ТДА. Чистого алюминия не обнаружено, он входит в состав сложных соединений алюмосилицидов хрома и железа –  $\text{FeAl}_3\text{Si}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_3\text{Si}_3$ ,  $\text{Al}_{3,6}\text{CrSi}_{0,4}$ ,  $\text{CrAl}_{0,42}\text{Si}_{1,58}$ .

**Ключевые слова:** алюмосиликохром, комплексный сплав, термодинамически-диаграммный анализ, металлографический анализ, рентгенофазовый анализ.

**Введение.** В настоящее время ферросплавная отрасль является важнейшим звеном отечественной металлургии, занимая лидирующее положение не только в СНГ, но и в мире. Будущее развитие данной отрасли связано с выпуском конкурентоспособных на мировом рынке стандартных ферросплавов, а также созданием производств по выпуску высококачественных комплексных сплавов с использованием новых ресурсосберегающих технологий. В результате развивающиеся прогрессивные технологии сталеплавильного производства в ряде случаев должны усложняться и приспособливаться к существующему ассортименту ферросплавов (подогрев стали в ковше-печи, ввод порошковой проволоки и т.д.) [1]. Работа в данном направлении также требует гармонизации существующих стандартов по производству ферросплавов в СНГ и мире.

Наличие в Казахстане крупных месторождений минерального сырья благоприятствует созданию производств по получению новых видов сплавов и лигатур. Учитывая постоянно растущий мировой спрос на чистые, высококачественные ферросплавы, целесообразно и необходимо проведение научно-исследовательских работ, которые обеспечивают создание малозатратных технологических разработок нового поколения.

С учетом этих требований в Химико-металлургическом институте им. Ж. Абишева была разработана технология получения комплексного сплава алюмосиликохрома, который в дальнейшем будет использоваться при выплавке рафинированных марок феррохрома и легировании стали в ковше. Сущность технологии заключается в совместной электротермии некондиционных отсеков высокоуглеродистого феррохрома и низ-

кофосфористого высокозольного угля в качестве восстановителя, без применения дорогостоящего кокса. Кварцит использовался как нейтрализатор избыточного количества углерода в угле, а процесс выплавки осуществлялся бесшлаковым, одностадийным способом.

Технология для выплавки алюмосиликохрома отрабатывалась в укрупненно-лабораторной руднотермической печи мощностью трансформатора 200 кВА. Проведенные испытания показали принципиальную возможность получения комплексного сплава алюмосиликохрома, содержащего в своем составе, %: кремния – 45-55; алюминия – 10-15; хрома – 10-30; углерода – 0,3-0,8; фосфора – 0,02-0,03; железа – 10-18 [2].

Ранее методом термодинамически-диаграммного анализа (ТДА) была построена диаграмма фазового строения металлической системы Cr-Fe-Al-Si в жидком состоянии с целью определения последовательности происходящих в системе фазовых превращений и прогнозирования конечного состояния системы, которые характеризуют фазовые составы получаемого сплава алюмосиликохрома [3]. На рисунке 1 дано изображение полученной диаграммы, где её четыре грани представляют собой 4 трехкомпонентные системы: Si-Al-Fe, Si-Cr-Fe, Fe-Al-Cr и Si-Al-Cr. В результате проведенных расчетов установлено, что фазовые составы алюмосиликохрома характеризуются тетраэдром Si-FeSi<sub>2</sub>-Al-CrSi<sub>2</sub> (рисунок 1). Следовательно, преобладающими фазами в составе алюмосиликохрома должны стать именно эти соединения (вторичные фазы), а также продукты распада этих соединений.

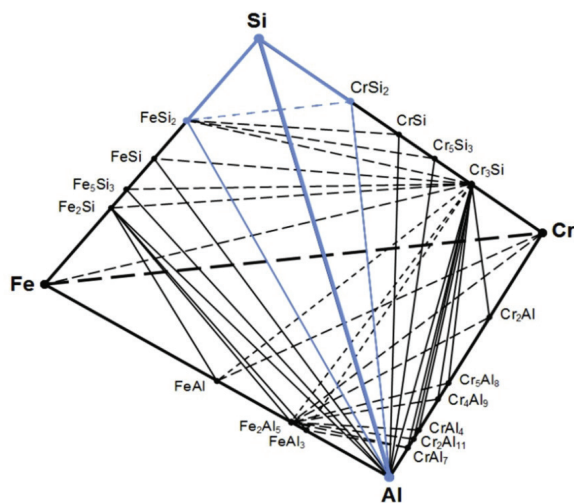


Рисунок 1 – Диаграмма фазового строения металлической системы Cr-Fe-Al-Si в жидком состоянии

Для подтверждения вышеизложенного, необходимо получить достоверную информацию о строении и свойствах изучаемого комплексного сплава алюмосиликохрома, а также знать количество, форму и размеры включений отдельных фаз в сплаве, их взаимное распределение. С этих позиций весьма актуальным является проведение рентгенофазового и металлографического анализа образцов комплексного сплава алюмосиликохрома.

**Цель работы** – выявление микроструктуры и идентификация отдельных фаз комплексного сплава алюмосиликохрома с помощью рентгенофазового, микроструктурного анализов и доказательство по результатам проведенных микроструктурных исследований применимости ТДА при разработке новых видов комплексных сплавов.

**Задачи исследования.** В соответствии с указанной целью в работе решались следующие задачи:

- определение химического состава и количества отдельных фаз;
- исследование структуры существующих фаз в сплаве;
- сопоставление результатов, полученных с помощью РФА, с данными ТДА.

**Экспериментальная часть.** Рентгенофазовый анализ позволяет идентифицировать различные фазы в их смеси на основе анализа дифракционной картины, даваемой исследуемым образцом. Основным методом фазового анализа является метод порошка, по которому определяется химический состав и фазовое состояние кристаллов. Параллельно измеряются параметры кристаллической решетки, определяется степень кристаллизованности.

Для проведения рентгенофазового анализа использовали порошки дисперсностью 10-20 мкм. Для достижения указанных размеров частиц, образцы комплексного сплава алюмосиликохрома тщательно перетирались в ступке с последующим просеиванием на сите с соответствующим размером ячеек. Во избежание деформации кристаллов, неизбежной при сухом истирании, измельчение проводилось в спиртовой среде. Готовые для съемки образцы запрессовывались с помощью предметного стекла в специальную кювету кварца. Для дополнительного уплотнения порошка в нее закапывался спирт с небольшой примесью канифоли.

Для получения достоверной дифракционной картины анализируемой фазы, в процессе под-

готовки образца проводилось разделение его на фракции с целью обогащения необходимой фазой. Съемка образцов для рентгенофазового анализа проводилась на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-2».

Структуру базовых и избыточных фаз изучали с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «VEGA\LSU» производства компании «TESCAN» с вольфрамовым катодом, который может увеличивать изучаемую область образца до миллиона раз.

Исследования элементного состава зондированной точки конкретной фазы, выявленной при визуальном осмотре микроструктуры в электронном микроскопе, проводились с помощью системы микроанализа INCA Energy 350 с азотным энергодисперсионным спектрометром INCA PentaFETx3 производства компании «Oxford Instruments».

Поверхности ранее изготовленных шлифов были тщательно отполированы и протравлены спиртовым раствором азотной кислоты (4 % азотная кислота + спирт). Данный реактив широко применяется в качестве макрореактива, так как наиболее пригоден для выявления общей структуры изучаемых материалов. С целью достижения лучшего результата, процессы полировки и травления были проведены несколько раз. Остатки травильного раствора удаляли ватным тампоном, смоченным в этиловом спирте, затем шлифы высушивали фильтровальной бумагой.

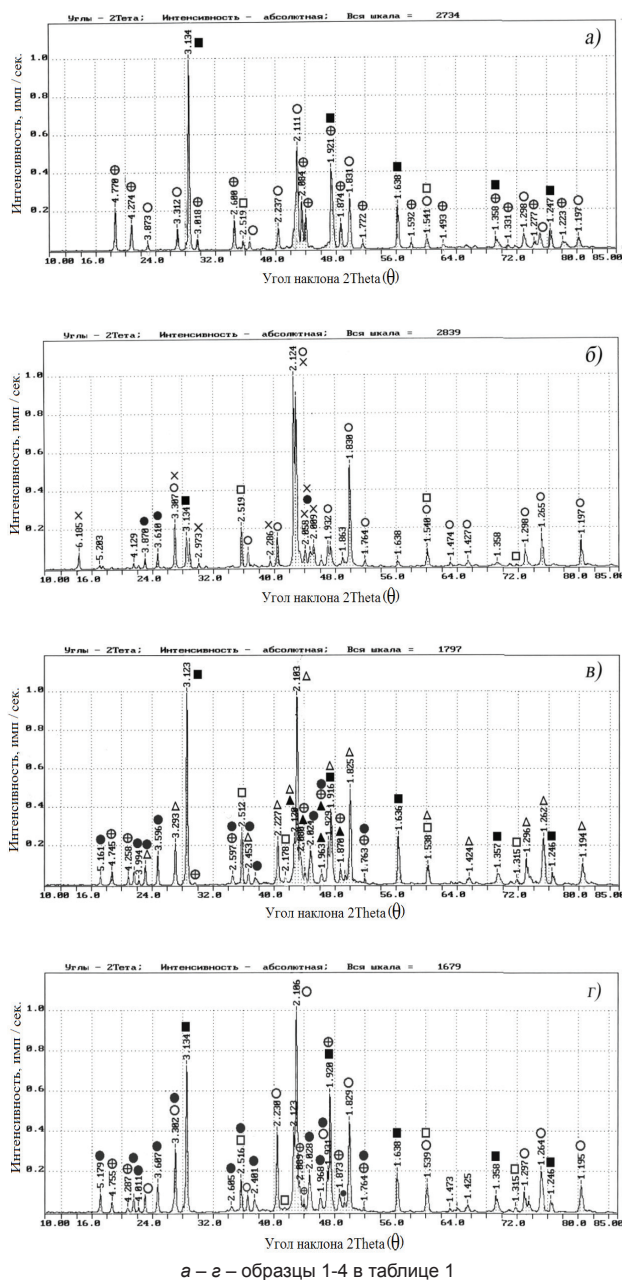
Химические составы исследуемых образцов сплава представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав комплексного сплава алюмосиликохрома

№ образца	Содержание компонентов, мас. %					
	Si	Al	Cr	Fe	C	P
1	59,56	10,84	11,39	16,74	0,82	0,022
2	47,69	15,32	20,59	16,16	0,59	0,031
3	47,95	14,92	28,95	11,25	0,56	0,05
4	45,43	13,22	25,7	10,0	0,83	0,054

**Обсуждение результатов.** В результате проведения РФА обнаружены следующие фазы:  $\text{Si}_{\text{мет}}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{CrAl}_{0,42}\text{Si}_{1,58}$ ,  $\text{FeAl}_3\text{Si}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_3\text{Si}_3$ ,  $\text{FeCr}$ ,  $\text{CrSi}_2$ ,  $\text{Al}_{3,6}\text{CrSi}_{0,4}$ . В исследуемых образцах не удалось идентифицировать некоторые фазы по причине неполноты имеющейся картотеки ICPDS с дифракционными данными для соединений и мине-

ралов. Полученные рентгеновские дифрактограммы исследуемых образцов комплексного сплава алюмосиликохрома представлены на рисунке 2.



а – г – образцы 1-4 в таблице 1

■ –  $\text{Si}_{\text{мет}}$ , □ –  $\text{SiC}$ , + –  $\text{CrAl}_{0,42}\text{Si}_{1,58}$ , ⊕ –  $\text{FeAl}_3\text{Si}_2$ ,  
● –  $\text{Fe}_2\text{Al}_3\text{Si}_3$ , ▲ –  $\text{FeCr}$ , △ –  $\text{CrSi}_2$ , × –  $\text{Al}_{3,6}\text{CrSi}_{0,4}$

Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов комплексного сплава алюмосиликохрома

В целом, предварительная проверка фазового состава комплексного сплава алюмосиликохрома рентгенофазовым анализом и сопоставление полученных при этом данных с результатами ТДА подтвердила применимость геометрической термодинамики (т.е. ТДА) в прогнозировании и



изучении динамики изменения фазовых превращений, происходящих в природном сырье или конечных продуктах металлургического передела.

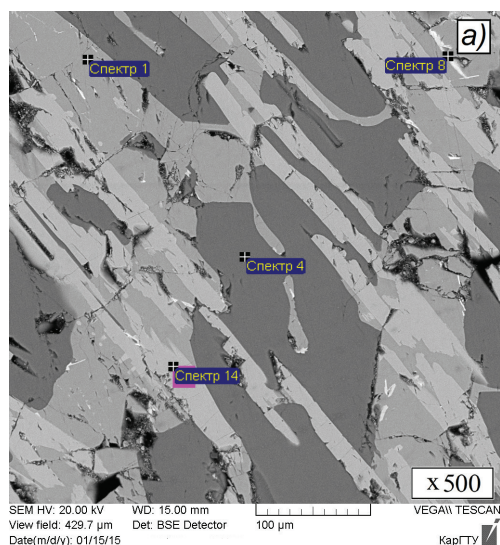
Анализ структуры отшлифованных поверхностей с использованием СЭМ показал более многообразную картину структуры сплава. С помощью электронной микроскопии на всех четырех металлографических шлифах были рассмотрены 49 участков. В целом по структуре и качественному анализу рассматриваемые пробы сильно не отличаются. Поэтому для детального анализа и обсуждения выбраны образцы № 1, 3, отличающиеся по содержанию в них основных элементов.

Структура алюмосиликохрома представлена крупными образованиями в виде полос и пластин, которыми являются кристаллы чистого кремния, эвтектика Al-Si-Cr-Fe и интерметаллические соединения  $(\text{Fe,Cr})_x\text{Al}_y\text{Si}_z$ ,  $(\text{Fe,Cr})_x\text{Si}_y\text{Ti}_z$ ,  $\text{Ti}_x\text{Cr}_y\text{Si}_z$ . Алюминий в свободном виде не обнаружен. Согласно данным рентгенофазового анализа он входит в состав алюмосилицидов хрома и железа ( $\text{Al}_{3,6}\text{CrSi}_{0,4}$ ,  $\text{CrAl}_{0,42}\text{Si}_{1,58}$ ,  $\text{FeAl}_3\text{Si}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_3\text{Si}_3$ ). Образцы алюмосиликохрома, как и во всех комплексных сплавах, характеризуются множеством микропор различного размера и в изломе имеют мелкозернистую однородную структуру.

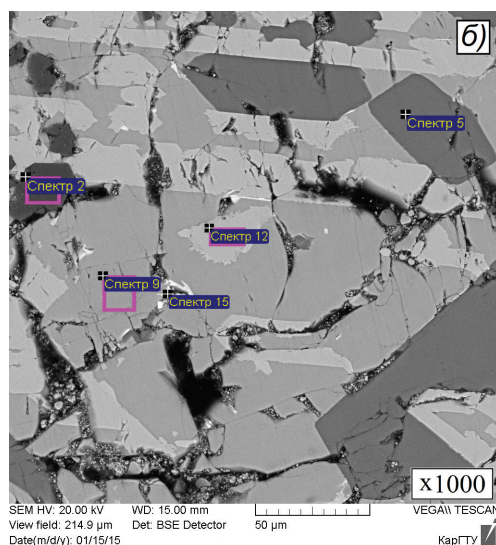
Установлена неравномерность распределения компонентов по объему образца. Например, с помощью системы микроанализа INCA Energy 350 определено, что содержание углерода в отдельных зондированных участках сплава алюмосиликохрома составляет от 29,8 % до 34,5 % (по

массе), тогда как аналитический метод определения составов показал 0,56 % C (таблица 1, образец № 3). По мнению авторов [4, 5], неравномерность распределения элементов по объему исходного образца объясняется процессами ликвации и скоростью кристаллизации в период затвердевания слитка металла. В работах [6, 7] проводились исследования по выравниванию состава ферросплавов, в частности, феррохрома и ферросилиция путем их обжига до 800 °С. Показано, что на образование фазовых переходов и метастабильных фаз в сплавах оказывает влияние процесс термообработки, т.е. обжиг, который приводит к усреднению и выравниванию составов вышеуказанных ферросплавов.

На рисунках 3 и 4 представлены микроснимки металлографических шлифов проб № 1 и № 3. Микрофотографии получены на растровом электронном микроскопе «TESCAN VEGA\LSU». На рисунке 3а представлена микроструктура пробы № 1 при  $\times 500$ -кратном увеличении. В составе алюмосиликохрома обнаружены 4 вида металлической фазы на основе алюминия, кремния, хрома и железа, несколько различающиеся по содержанию этих металлов, с примесями титана, магния и никеля. Вышеперечисленные примеси в состав алюмосиликохрома вносятся из золы высокозольного угля ( $A^c = 57\text{--}65\%$ ), содержание которых в оксидной форме варьируется в пределах 0,5–2,0 %. Присутствующие фазы по химическому составу и цвету были идентифицированы следующим образом:



кратность увеличения а)  $\times 500$ ,



кратность увеличения б)  $\times 1000$

Рисунок 3 – Микроструктура образца № 1

- серые зерна с темным оттенком, занимающие 32,1 % площади от общей изучаемой поверхности образца, являются сплавом системы Fe-Si-Al (спектр 1).

- преобладающей фазой являются темно-серые крупные пластинчатые зерна чистого Si, занимающие 39,8 % площади рассматриваемого участка (спектр 4);

- ярко-белые, занимающие незначительную площадь (1,2 %) – сплав системы Fe-Si-Al с примесями магния и никеля (спектр 8);

- светлые фазы, имеющие удлиненную вытянутую форму, занимающие 23,7 % поверхности образца – интерметаллид типа  $(\text{Cr}, \text{Ti})_x\text{Al}_y\text{Si}_z$  (спектр 14).

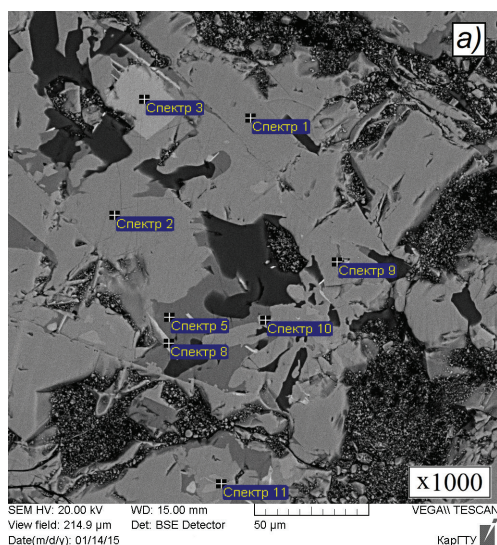
Остальную часть рассматриваемой области шлифа занимают неравномерно расположенные поры и трещины различного размера.

Далее, при увеличении  $\times 1000$  заново были сделаны микроснимки металлографического шлифа образца № 1 (рисунок 3б), что позволило полнее выявить микроструктуру фаз и провести количественную оценку структурных составляющих. При детальном рассмотрении поверхности образца № 1 обнаружена кальций- и никельсодержащая фаза (спектр 15) сложного химического состава, а также на основе кремния образовался твердый раствор, содержащий 5,72 % алюминия (спектр 2). Занимаемая площадь обеих фаз на рассматриваемом участке шлифа составляет 3,6 % и 8,6 % соответственно. В целом видны те же фазы, что и на рисунке 3а, несколько различающиеся по содержанию

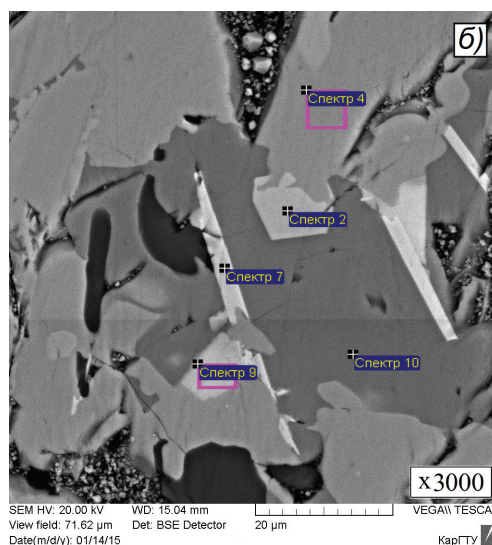
в них элементов. Объемная доля фазы чистого кремния в виде широких полос с темно-серым цветом составляет 15,8 % (спектр 5). К описанной фазе примыкает серая область с темноватым оттенком (спектр 9), занимая почти половину поверхности образца (40,4 %). Внутри этой фазы в замкнутом пространстве находится другая структурная составляющая светло-серого цвета, соответствующая сплавам тройной системы Fe-Si-Al (спектр 12). Визуально данная фаза характеризуется в виде зерен неправильной формы с четкими краями, но края некоторых отдельных зерен отличаются игольчатыми выделениями.

Изучив микроструктуру образца № 3 при кратности увеличения  $\times 1000$  (рисунок 4а), обнаружили карбиды, расположенные между порами и изломами с размером 40-50 мкм. Содержание углерода в карбидной фазе находится в пределах 29,82-34,49 %, что приблизительно соответствует соединению  $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ .

При детальном рассмотрении ( $\times 3000$ ) участка на поверхности опытного сплава № 3 видны те же фазы, что и в предшествующих образцах (рисунок 4б). Микроструктура сплава представлена, в основном, хорошо выявленными структурными фазами. Так же, как и в предыдущих микрофотографиях образцов, изломы и поры занимают большую площадь, равную 15,7 % от общей поверхности анализируемого участка. Следует отметить законченность формирования частиц большого и маленького размера. Химический состав пробы № 3, исследованной при кратности увеличения



кратность увеличения а)  $\times 1000$



кратность увеличения б)  $\times 3000$

Рисунок 4 – Микроструктура образца № 3



×1000, представлен в таблице 2 (в массовых %) и таблице 3 (в атомных %).

Таблица 2 – Химический состав (в мас. %) пробы № 3, исследованной при кратности увеличения ×1000

Спектры	Содержание элементов, мас. %							Σ
	Al	Si	Cr	Fe	C	Ti	Ca	
Спектр 1	2,50	32,25	30,76	0	34,49	0	0	100
Спектр 2	21,94	18,53	0	29,71	29,82	0	0	100
Спектр 3	16,39	29,97	0	32,09	0	21,55	0	100
Спектр 5	35,41	38,78	0	25,81	0	0	0	100
Спектр 8	10,72	39,93	0	35,71	0	4,99	0	91,35
Спектр 9	29,69	37,20	0	33,11	0	0	0	100
Спектр 10	26,20	37,84	0	33,46	0	0	2,50	100
Спектр 11	7,37	50,02	0	42,61	0	0	0	100
Среднее	18,78	35,57	3,84	29,06	8,04	3,32	0,31	98,92
Макс.	35,41	50,02	30,76	42,61	34,49	21,55	2,50	100
Мин.	2,50	18,53	30,76	25,81	29,82	4,99	2,50	91,35

Таблица 3 – Химический состав (в ат. %) пробы № 3, исследованной при кратности увеличения ×1000

Спектры	Содержание элементов, ат. %							Σ
	Al	Si	Cr	Fe	C	Ti	Ca	
Спектр 1	1,97	24,41	12,58	0	61,04	0	0	100
Спектр 2	18,12	14,71	0	11,86	55,32	0	0	100
Спектр 3	22,51	39,53	0	21,29	0	16,67	0	100
Спектр 5	41,59	43,76	0	14,65	0	0	0	100
Спектр 8	14,95	53,50	0	24,06	0	3,92	0	96,43
Спектр 9	36,47	43,89	0	19,64	0	0	0	100
Спектр 10	32,58	45,21	0	20,10	0	0	2,10	100
Спектр 11	9,69	63,22	0	27,09	0	0	0	100
Среднее	22,24	41,03	1,57	17,34	14,54	2,57	0,26	99,55
Макс.	41,59	63,22	12,58	27,09	61,04	16,67	2,10	100
Мин.	1,97	14,71	12,58	11,86	55,32	3,92	2,10	96,43

Примечание: Анализы выполнены в ИЛИП «Комплексное освоение ресурсов минерального сырья» на базе КарГТУ. Аналитик Савельева Н. А.

Как видно из таблицы 3, атомное соотношение железо : кремний составляет примерно 1:2, что является оптимальным для формирования дисилицида железа ( $\text{FeSi}_2$ ).

Из рисунка 4 б видно, что в центре рассматриваемой области фаза ферроалюмосиликотитана

(спектр 2) представлена в гексагональной форме и занимает 7,5 % площади при значении поля обзора 71,62 мкм. Она целиком расположена внутри фазы системы Fe-Si-Al (спектр 10), а поверх них проникает другая фаза системы Fe-Si-Al с меньшим содержанием алюминия. Спектры 4 и 10 имеют практически одинаковый химический состав и отличаются содержанием алюминия 30,15 % и 37,27 % (по массе) соответственно. Спектр 7 представлен фазой ярко-белого цвета, имеет тонкую вытянутую игольчатую структуру и занимает незначительную площадь на поверхности испытанного образца 2,25 %. Отличается наличием в нем титана до 5,26 мас. % и 4,03 ат. % соответственно. Спектр 9 занимает 8,38 % площади исследуемого участка шлифа, в микроструктуре данной фазы кроме основных сплавобразующих элементов (Cr, Si, Al и Fe) содержится незначительное количество кальция 1,64 мас. %.

**Выводы.** Выполненные рентгенофазовые и металлографические исследования позволяют предложить общую классификацию фаз и структур многокомпонентного комплексного сплава алюмосиликохрома, содержащего алюминий, кремний, хром и железо. Микроструктура всех образцов характеризуется наличием значительного количества кремния, который находится в структурно-свободном состоянии, а также эвтектикой Al-Si-Cr-Fe и интерметаллическими соединениями  $(\text{Fe,Cr})_x\text{Al}_y\text{Si}_z$ ,  $(\text{Fe,Cr})_x\text{Si}_y\text{Ti}_z$ ,  $\text{Ti}_x\text{Cr}_y\text{Si}_z$ . Рентгенофазовым анализом выявлено, что в составе алюмосиликохрома активные элементы (Si, Al, Cr) присутствуют в виде простых и сложных соединений, таких как  $\text{Si}_{\text{мет}}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{FeCr}$ ,  $\text{CrSi}_2$ ,  $\text{CrAl}_{0,42}\text{Si}_{1,58}$ ,  $\text{FeAl}_3\text{Si}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_3\text{Si}_3$ ,  $\text{Al}_{3,6}\text{CrSi}_{0,4}$ , что соответствует результатам ТДА. Таким образом, сопоставив результаты рентгенофазового анализа с данными ТДА металлической системы Cr-Fe-Al-Si, подтвердили применимость последнего при изучении фазовых превращений, происходящих в промежуточных и конечных продуктах металлургического процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Жучков В.И., Андреев Н.А. Изучение свойств и разработка рациональных составов ферросплавов // Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья: Матер. Междунар. науч. практ. конф., посвященной 90-летию Букетова Е.А. – Караганда, Казахстан, 2015. – С. 185-190.
- 2 Mekhtiev A., Shabanov Ye., Issagulov A., Baissanov S., Baissanov A., Issagulova D. Development of technology of complex aluminum-silicon-chrome alloy with utilization of off-grade raw materials // Journal for Theory and Practice in Metallurgy. – 2015. – № 1. – P. 157-160.

3 Baisanov S., Shabanov Ye., Baisanov A., Issagulov A., Laurent Ch. Diagram of phase structure of Fe-Cr-Si-Al metallic system in liquid state // Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry: Proceedings of 14<sup>th</sup> Intern. Ferroalloys Congress INFACON XIV. – Kiev, Ukraine, 2015. – P. 540-547.

4 Поголоцкий Д.Я., Рощин В.Е., Рысс М.А., Строганов А.И., Ярцев М.А. Электрометаллургия стали и ферросплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 551 с.

5 Друинский М.И., Жучков В.И. Получение комплексных ферросплавов из минерального сырья Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 208 с.

6 Чепуштанова Т.А., Адельбаев И.Е., Луганов В.А. Термогравиметрическое исследование феррохрома // Вестник КазНТУ. – 2009. – № 5. – С. 33-36.

7 Чепуштанова Т.А., Адельбаев И.Е., Луганов В.А. Термогравиметрическое исследование ферросилиция // Вестник КазНТУ. – 2010. – № 1. – С. 25-28.

## REFERENCES

1 Zhuchkov V.I., Andreev N.A. *Izuchenie svoystv i razrabotka racional'nykh sostavov ferrosplavov* (The study of the properties and development of rational composition of ferroalloys). *Khimiya i metallurgiya kompleksnoj pererabotki mineral'nogo syr'ya: Mater. Mezhdunar. nauch. prakt. konf., posvyashchennoj 90-letiyu Buketova E.A.* (Chemistry and metallurgy complex processing of mineral raw materials: Materials of International scientific-practical conference

devoted to the 90<sup>th</sup> anniversary of Buketov E.A.), Karaganda, Kazakhstan, **2015**. 185-190 (in Russ.).

2 Mekhtiev A., Shabanov Ye., Issagulov A., Baissanov S., Baissanov A., Issagulova D. Development of technology of complex aluminum-silicon-chrome alloy with utilization of offgrade raw materials. *Journal for Theory and Practice in Metallurgy*. **2015**. 1, 157-160 (in Eng.).

3 Baisanov S., Shabanov Ye., Baisanov A., Issagulov A., Laurent Ch. *Diagram of phase structure of Fe-Cr-Si-Al metallic system in liquid state*. Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry: Proceedings of 14<sup>th</sup> Intern. Ferroalloys Congress INFACON XIV. Kiev, Ukraine, **2015**. 540-547 (in Eng.).

4 Povolotskij D.Ya., Roshchin V.E., Ryss M.A., Stroganov A.I., Yartcev M.A. *Ehlektrometallurgiya stali i ferrosplavov* (Electrometallurgy steel and ferroalloys). Moscow: Metallurgiya, **1974**. 551 (in Russ.).

5 Druinskij M.I., Zhuchkov V.I. *Poluchenie kompleksnykh ferrosplavov iz mineral'nogo syr'ya Kazakhstana* (Preparation of complex ferroalloys from mineral raw materials of Kazakhstan). Alma-Ata: Nauka, **1988**. 208 (in Russ.).

6 Chepushtanova T.A., Adel'baev I.E., Luganov V.A. *Termogravimetricheskoe issledovanie ferrokhroma* (Thermogravimetric study of ferrochrome). *Vestnik KazNTU = Bulletin of Kazakh National Technical University*. **2009**. 5, 33-36 (in Russ.).

7 Chepushtanova T.A., Adel'baev I.E., Luganov V.A. *Termogravimetricheskoe issledovanie ferrosiliciya* (Thermogravimetric study of ferrosilicon). *Vestnik KazNTU = Bulletin of Kazakh National Technical University*. **2010**, 1, 25-28 (in Russ.).

## ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада рентгенфазалық және металлографиялық талдаулар көмегімен жүргізілген кешенді алюмосиликохром қорытпасының фазалық құрамын анықтауға арналған зерттеулердің нәтижесі келтірілген. Сканерлейтін электрондық микроскопты қолдана отырып, дайындалған шлифтардың үстіңгі бетін талдау қорытпа құрылысының сан-алуандығын көрсетті. Алюмосиликохромның құрылысы жолақтар мен жазық табақша тәрізді таза кремнийдің кристалдарынан, Al-Si-Cr-Fe эвтектикасынан және  $(\text{Fe,Cr})_x\text{Al}_y\text{Si}_z$ ,  $(\text{Fe,Cr})_x\text{Si}_y\text{Ti}_z$ ,  $\text{Ti}_x\text{Cr}_y\text{Si}_z$  интерметалдық қосылыстарынан тұрады. Карбидті фазадағы көміртектің мөлшері 29,82-34,49% аралығында болғандықтан, оны шамамен  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  қосылысы түрінде кездеседі деп айтуға болады. Сонымен қатар, қорытпа компоненттерінің зерттеліп отырған үлгінің барлық көлеміне тең таралмауы анықталды. Бұл жағдай металдың суып-қатаю уақыты аралығындағы жүретін ликвидация үрдістерімен және кристаллизациялану жылдамдығымен түсіндіріледі. Рентгенфазалық және металлографиялық талдаулар мен термодинамикалы-диаграммалық талдаудың (ТДТ) нәтижелерін салыстыра отырып, металлургиялық қайта өңдеу кезіндегі аралық және соңғы өнімдер ішінде жүретін фазалық ауысулардың өзгеру динамикасын зерттеуге ТДТ-ның нәтижелерін қолдануға болатындығы расталды. Осыған дейін жүргізілген Cr-Fe-Al-Si металдық жүйесінің ТДТ-ы барысында алюмосиликохром құрамында Si, FeSi<sub>2</sub>, Al, CrSi<sub>2</sub> қосылыстарының және осы қосылыстар ыдырағанда пайда болатын өнімдердің көп кездесетіндігі анықталған болатын. Рентгенфазалық мәліметтер бойынша алюмосиликохром құрамындағы анық байқалған фазалар – таза кремний ( $\text{Si}_{\text{мет}}$ ) және SiC, FeCr, CrSi<sub>2</sub>. Бұл мәліметтер ТДТ-ның нәтижелерімен сәйкес келеді. Таза алюминий табылған жоқ, ол  $\text{FeAl}_3\text{Si}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_3\text{Si}_3$ ,  $\text{Al}_{3,6}\text{CrSi}_{0,4}$  және  $\text{CrAl}_{0,42}\text{Si}_{1,58}$  секілді күрделі қосылыстар – хром мен темір силицидтерінің құрамына кіреді.

**Түйінді сөздер:** алюмосиликохром, кешенді қорытпа, термодинамикалы-диаграммалық талдау, металлографиялық талдау, рентгенфазалық талдау.

## SUMMARY

The results of investigation of the phase composition and structure of the complex aluminum-silicon-chrome alloy by the X-ray phase and metallographic analysis are presented in the article. The analysis of the structure of polished surfaces with the use of the scanning electronic microscope showed a more diverse picture of the alloy structure. The structure of aluminum-silicon-chrome is presented by large formations in the form of strips and plates that are pure silicon crystals, the Al-Si-Cr-Fe eutectics and intermetallic compounds  $(\text{Fe,Cr})_x\text{Al}_y\text{Si}_z$ ,  $(\text{Fe,Cr})_x\text{Si}_y\text{Ti}_z$ ,  $\text{Ti}_x\text{Cr}_y\text{Si}_z$ . The carbon content in the carbide phase is within the range of 29.82-34.49 % that approximately corresponds to the  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  compound. It was established the uneven distribution of components through the sample volume that is explained by the processes of liquation and speed of crystallization during the metal ingot hardening. Comparison of the X-ray phase and metallographic analyses data with the results of the thermodynamic-diagram analysis (TDA) confirms applicability of the TDA method for forecasting and studying of change dynamics of phase transformations that take place in the intermediate and final products of metallurgical conversion. So, the TDA of the Cr-Fe-Al-Si metal system carried out earlier shown that prevailing phases are compounds

of Si,  $\text{FeSi}_2$ , Al and  $\text{CrSi}_2$ , as well as the products of these compounds disintegration. According to the X-ray phase analysis data the most pronounced phases in the alloy are structural-free silicon ( $\text{Si}_{\text{met}}$ ) and phases SiC, FeCr,  $\text{CrSi}_2$  that corresponds to the TDA results. There was not revealed pure aluminum, it is a part of complex compounds, aluminous silicides of chromium and iron:  $\text{FeAl}_3\text{Si}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_3\text{Si}_3$ ,  $\text{Al}_{3,6}\text{CrSi}_{0,4}$ ,  $\text{CrAl}_{0,42}\text{Si}_{1,58}$ .

**Key words:** aluminum-silicon-chrome, complex alloy, thermodynamic-diagram analysis, metallographic analysis, X-ray phase analysis.

Поступила 07.04.2016

УДК 620.22

Комплексное использование  
минерального сырья. № 2. 2016.

Ф. Р. КАПСАЛАНОВА<sup>1</sup>\*, Б. К. КЕНЖАЛИЕВ<sup>2</sup>,  
В. Г. МИРОНОВ<sup>1</sup>, Г. Т. ШИЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, \*dfr\_09.10@mail.ru  
<sup>2</sup>АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения», Алматы,

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБЪЕМЕ ПОРОШКА СИСТЕМЫ Fe-Ni-Cr-Cu-Si-B-C В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В исходный состав порошковых наплавочных сплавов вводятся различные легирующие элементы для придания сплаву определенных физических, химических, механических и самофлюсующихся свойств. Такие сплавы широко используются в практике восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов с применением технологий термического нанесения, в частности газопламенной наплавки покрытий. В настоящей работе применен метод механохимического легирования для получения нового самофлюсующего наплавочного порошкового материала на основе железа для газопламенного нанесения покрытий. Состав разрабатываемого наплавочного порошкового сплава на основе железа содержит следующие химические элементы, мас. %: Fe – 36-40; Cr – 15-18; Ni – 30-35; B – 2,5-4; Cu – 3-5; C – 0,6-1,0; Si – 3-5. С целью оптимизации технологических параметров получения порошкового материала для газопламенного покрытия методом механохимического легирования в работе исследовано влияние времени обработки на процесс механоактивации системы Fe-Ni-Cr-Cu-Si-B-C. Реакционное механохимическое легирование основано на обработке шихты в энергонапряженных мельницах, при котором получают композиции с требуемой дисперсностью порошка, имеющего однородное распределение исходных компонентов. В результате проведенных исследований выявлено, что такое легирование является эффективным способом получения наплавочного материала для газопламенной наплавки.

**Ключевые слова:** механохимическое легирование, энергонапряженная мельница, наплавочный сплав, газопламенная наплавка.

**Введение.** В практике восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов с применением технологий термического нанесения покрытий широко используются порошковые наплавочные сплавы, в исходный металл которых вводятся различные легирующие элементы для придания сплаву определенных физических, химических и механических свойств. Состав и свойства порошковых наплавочных материалов зависят от способа их нанесения на поверхность обрабатываемой детали [1].

Среди существующих методов нанесения покрытий перспективным является газотермическое напыление [2, 3], в частности газопламенная наплавка [4]. Основными преимуществами метода являются низкое тепловложение в упрочня-

емую деталь, возможность получения покрытия практически из любого материала, простота и универсальность [5].

Для газопламенного нанесения покрытий на стальные детали используются специальные порошковые износостойкие сплавы. Для придания наплавленной поверхности различной твердости разработаны сплавы с заданной твердостью от 35 HRC до 55 HRC типа ПСР-2, ПСР-3, ПСР-4 и др. (ГОСТ 21.448-75) на основе кобальта, никеля, меди с различными карбидообразующими добавками, обеспечивающими необходимые физико-механические свойства наплавленного (нанесенного) покрытия. Твердость покрытия обеспечивается непосредственно после наплавки без последующей термообработки.