

## О МЕХАНИЗМЕ И ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ АЗОТИРОВАНИЯ ФЕРРОСИЛИЦИЯ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Л. Н. Чухломина, Ю. М. Максимов, В. Д. Китлер, О. Г. Витушкина

Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск  
maks@fisman.tomsk.ru

Исследован процесс азотирования ферросилиция в режиме горения. Установлено, что путем разбавления исходного сплава конечным продуктом, а также введением галоидных солей аммония и магния можно увеличить глубину превращения и получить двухфазный продукт горения, состоящий из нитрида кремния и железа. Показано, что процесс азотирования ферросилиция осуществляется в интервале температур от 900 °С до температуры горения и является многостадийным. Температура начала взаимодействия ферросилиция с азотом совпадает с температурой фазового перехода  $\alpha$ -лебоит  $\rightarrow$   $\beta$ -лебоит.

Ключевые слова: СВС, азотирование, ферросплавы, химическое обогащение, нитриды.

### ВВЕДЕНИЕ

Закономерности горения кремния в азоте с образованием нитрида кремния были рассмотрены в работах [1, 2]. Результаты этих исследований используются для промышленного производства нитрида кремния и композиционных материалов на его основе [3]. В то же время возрастающий спрос на керамические материалы из нитрида кремния вызывает необходимость поиска более экономичных способов его производства. Ранее в работах [4, 5] была показана возможность получения нитридов с использованием в качестве сырья промышленных ферросплавов. Настоящая работа является продолжением этих исследований и посвящена изучению процесса получения нитрида кремния путем сжигания ферросилиция в азоте с последующим отделением  $\text{Si}_3\text{N}_4$  от железа в растворе кислоты. С целью получения максимального выхода конечного продукта исследованы закономерности горения ферросилиция в азоте, изучен механизм образования нитрида кремния.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования выбран промышленный ферросилиций марки ФС-75 с массовым содержанием кремния в сплаве 79.8 %. Сплав представляет собой двухфазный

материал, состоящий из кремния и высокотемпературного лебоита ( $\text{FeSi}_2$ ). Особенностью исследуемого сплава является его низкая температура плавления. Как следует из диаграммы состояния Fe—Si [6], температура появления жидкой фазы соответствует температуре плавления эвтектики  $\text{FeSi}_2$ —Si (1206 °С), в то время как температура плавления кремния 1415 °С.

Перед сжиганием исходный сплав измельчался до дисперсности менее 100 мкм. По результатам ситового анализа исследуемый ферросилиций преимущественно состоял из частиц следующих фракций: менее 40 мкм (71 %), 40 ÷ 63 мкм (27.5 %) и 63 ÷ 100 мкм (1.5 %). Результаты химического анализа каждой фракции показали, что содержание кремния зависит от дисперсности порошка и растет с увеличением размера частиц. Так, самая крупная фракция содержит 87.5 %, средняя 81.29 % и самая мелкая 79.1 % кремния. Порошок ферросилиция засыпался в цилиндрические трубки из металлической сетки диаметром 38 ÷ 60 мм. Относительная плотность образцов изменялась в пределах 0.3 ÷ 0.6. Образцы сжигались в установке постоянного давления в среде азота. Давление азота изменялось в диапазоне 1 ÷ 10 МПа. Воспламенение образцов осуществлялось от порошкообразной поджигающей смеси с помощью вольфрамовой спирали, через которую пропускали электрический ток. После прохождения фронта горения образец выдерживался в азоте до полного остывания, затем давление сбрасывалось, а продукт СВС извле-

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ и фонда CRDF в рамках программы BRNE (проект № 016-02).

кался из установки и подвергался кислотному обогащению с целью отделения нитрида кремния от железа.

Температуру горения измеряли вольфрам-рениевыми термопарами (ВР5-ВР20) диаметром 100 мкм, которые вводились в образец на глубину 15 мм. Изменение температуры регистрировали светолучевым осциллографом Н-117. Скорость распространения фронта горения измеряли с помощью фоторегистратора ФР-14.

Кислотное обогащение осуществлялось в реакционной колбе, в которой навеска азотированного ферросилиция заливалась раствором соляной кислоты различной концентрации (5 ÷ 35 %). По истечении заданного времени нерастворившийся остаток отделялся от раствора и исследовался на содержание основных компонентов по стандартным методикам химического анализа [7].

Детально взаимодействие ферросилиция с азотом изучали в условиях динамического нагрева со скоростью 10 °С/мин до температуры 1000 °С на ДТА-ТГ-анализаторе «Shimadzu-60». Азотирование печным способом осуществляли в трубчатой печи сопротивления в потоке азота в диапазоне температур 900 ÷ 1350 °С. Порошок массой 15 г насыпали в корундовые лодочки, помещали в предварительно нагретую до заданной температуры печь и выдерживали в течение 2 ч. В экспериментах использовались порошки кремния чистотой 99.99 % и ферросилиция с содержанием кремния 80.0 % и размером частиц менее 50 мкм.

Особенности микроструктуры, распределение концентраций элементов по образцу и фазовый состав материалов изучали методом локального рентгеноспектрального анализа на рентгеновском микроанализаторе «Camebax Microbeam» и дифрактометре ДРОН-2 с использованием Со-излучения. Удельная поверхность порошков определялась методом БЭТ.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ

Как показали расчеты, при давлениях азота до 10 МПа азота в порах недостаточно для поддержания горения в самораспространяющемся режиме. Следовательно, азот при горении ферросилиция поступал в зону горения из окружающего объема путем фильтрации по порам образца. В условиях фильтрационного подвода азота закономерности горения и состав

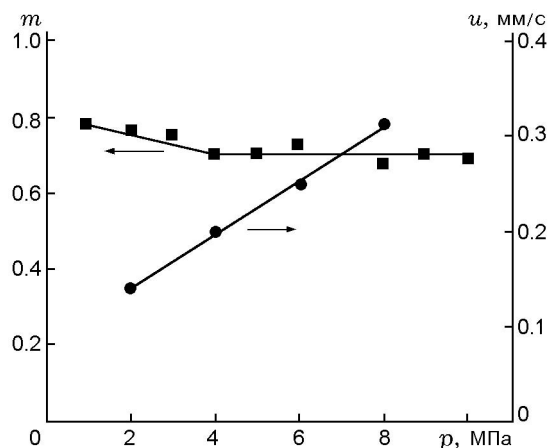


Рис. 1. Зависимость глубины превращения и скорости горения ферросилиция от давления

продуктов зависят от давления азота, дисперсности исходного ферросилиция, относительной плотности и диаметра образца.

*Зависимость глубины превращения и скорости горения ферросилиция от давления.* Глубину превращения ( $m$ ) определяли как отношение количества азота, поглощенного образцом, к количеству азота, необходимому для полного превращения кремния в нитрид кремния. Железо в данных условиях не образует нитридов, поскольку нитриды железа неустойчивы при высоких температурах (самый прочный в термическом отношении нитрид железа  $Fe_4N$  разлагается при 680 °С). В нашем случае значение  $m = 1$  соответствует образованию в процессе горения двухфазного материала, состоящего только из нитрида кремния и железа. Характерно, что во всем изученном диапазоне давлений  $m < 1$  (рис. 1) и с увеличением давления наблюдалось некоторое снижение глубины превращения. Последнее обстоятельство связано с низкой температурой плавления ферросилиция, вследствие чего наблюдалось заплавление пор жидкой фазой.

Зависимость скорости горения ферросилиция от давления типична для горения кремния в азоте. С ростом давления увеличивается скорость фильтрации к зоне реакции, что приводит к ускорению реакции на границе «конденсированная фаза — газ».

*Зависимость глубины превращения от диаметра* имеет сложный характер (рис. 2). Для изучаемой партии ФС-75 максимальная глубина превращения характерна для образ-

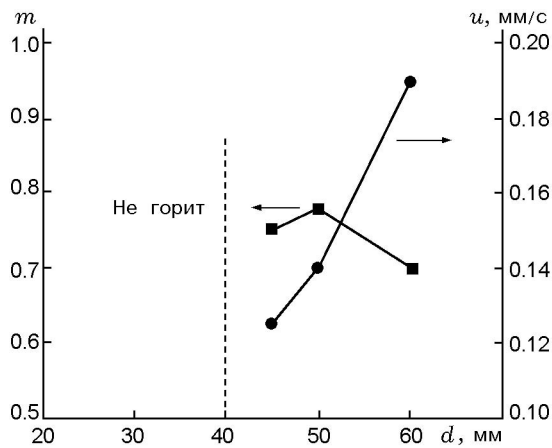


Рис. 2. Влияние диаметра образца на скорость горения и глубину превращения ферросилиция

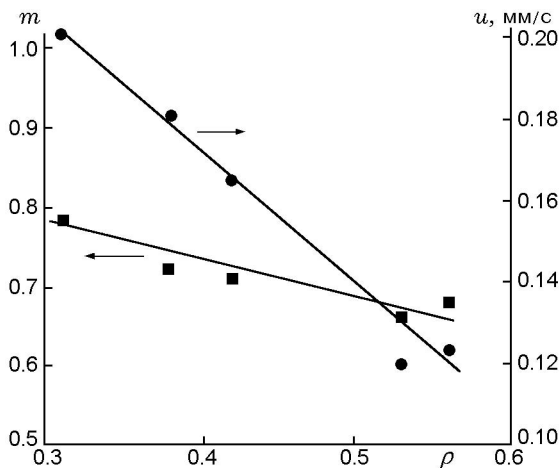


Рис. 3. Влияние относительной плотности на глубину превращения и скорость горения ферросилиция

цов диаметром 50 мм. Дальнейшее увеличение диаметра приводит к снижению глубины превращения. Это связано с тем, что с увеличением диаметра образца уменьшаются теплопотери, что приводит к оплавлению образца и нарастанию фильтрационных затруднений для подвода азота к зоне реакции. С уменьшением диаметра увеличивались теплопотери, уменьшалась температура горения, что приводило к постепенному затуханию. Образцы диаметром менее 40 мм не горели.

С увеличением исходной плотности образцов скорость горения и глубина превращения ферросилиция падают (рис. 3), так как с увели-

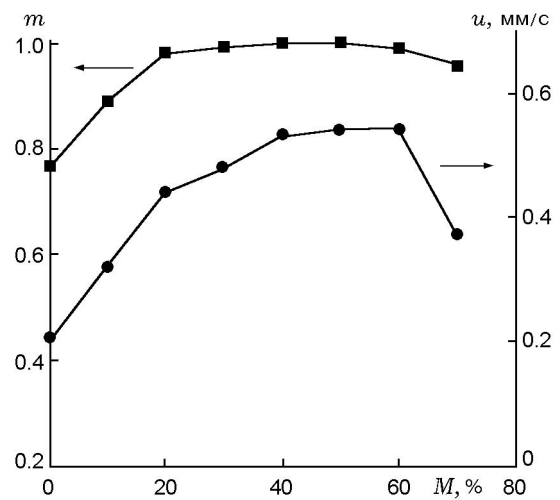


Рис. 4. Зависимость глубины превращения и скорости горения ферросилиция от разбавления исходной смеси азотированным ферросилицием ( $p = 4$  МПа)

чением плотности затрудняется подвод азота к зоне реакции. Поэтому для получения высокоазотированных продуктов горения в дальнейшем использовались образцы насыпной плотности.

*Влияние размера частиц на глубину превращения и скорость горения.* Для изучения влияния размера частиц на глубину превращения и скорость горения ферросилиция в азоте полидисперсный ферросилиций был разделен на четыре фракции: менее 20 мкм, менее 40 мкм,  $40 \div 63$  мкм и  $63 \div 100$  мкм. Эксперименты показали, что с увеличением размера частиц глубина превращения уменьшается. Ферросилиций с размером частиц  $63 \div 100$  мкм в отсутствие мелкой фракции не горит. С уменьшением размера частиц исходного ферросилиция глубина превращения и скорость горения растут, так как увеличивается реакционная поверхность азотируемого порошка.

Во всех приведенных примерах глубина превращения ферросилиция в нитрид была меньше единицы. Продукты горения кроме  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и Fe содержали также свободный кремний и силициды железа различного состава:  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ . Одним из эффективных приемов, повышающих глубину превращения, является разбавление исходной шихты различными добавками.

*Влияние разбавления на закономерности горения.* Для увеличения глубины превраще-

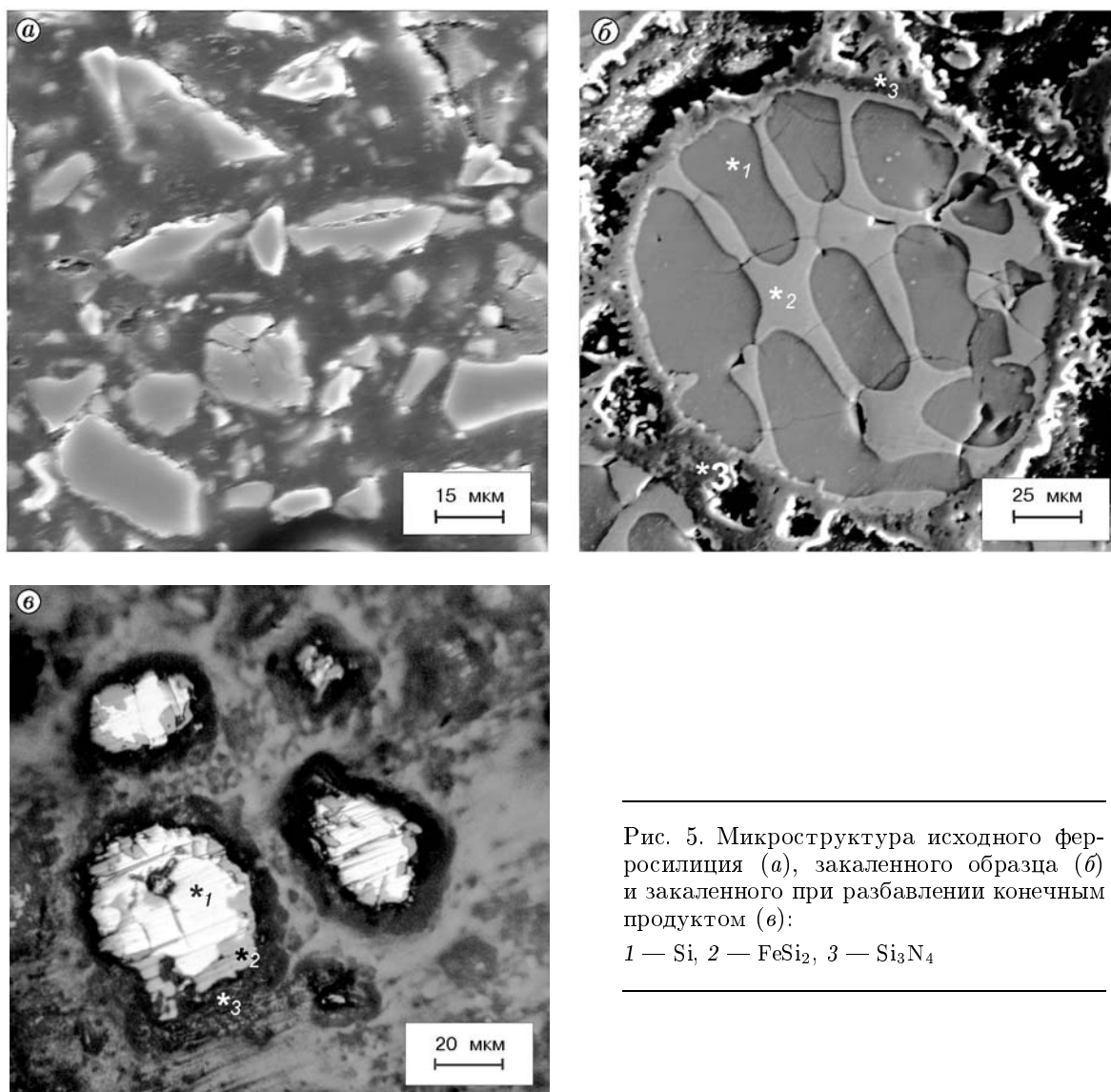


Рис. 5. Микроструктура исходного ферросилиция (а), закаленного образца (б) и закаленного при разбавлении конечным продуктом (в):

1 — Si, 2 — FeSi<sub>2</sub>, 3 — Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

ния исходный ферросилиций разбавляли азотированным ферросилицием с глубиной превращения 0.76. Из представленной на рис. 4 зависимости видно, что с увеличением массы добавки ( $M$ ) скорость горения и глубина превращения растут. (При расчете глубины превращения учитывалось количество азота, вводимое вместе с добавкой.)

При введении 40 ÷ 60 % добавки степень азотирования становится равной единице, при 70 %-м разбавлении скорость горения и глубина превращения несколько снижаются, а при дальнейшем разбавлении система не горит.

Изучение микроструктуры исходного сплава и закаленных (путем быстрого сброса азота) образцов показало, что на скорость го-

рения влияет плавление ферросилиция. Перед фронтом горения формируется область, для которой характерно наличие расплавленных частиц, размер которых по мере продвижения в сторону погашенного фронта увеличивается. В этой зоне происходят коагуляция расплавленных частиц и образование реакционных ячеек, размер которых в несколько раз превышает первоначальный размер частиц исходного ферросилиция (рис. 5, б). По данным рентгеновского микроанализа расплавленные частицы содержат силицид железа и кремний.

Исследование микроструктуры закаленного образца, створевшего с 60 %-й добавкой азотированного ферросилиция, показало, что интенсивной коагуляции частиц исходного ферроси-

Таблица 1  
Влияние добавок  
на глубину превращения ферросилиция

Добавка	$M, \%$	$m$
Чистый ферросилиций ФС-75	—	$0.75 \div 0.80$
Нитрид кремния, $Si_3N_4$	$45 \div 50$	1.0
Азотированный ферро- силиций ( $m = 0.76$ )	$40 \div 60$	1.0
Фторид магния, $MgF_2$	1.0	1.0
Фторид аммония, $NH_4F$	1.0	1.0
Хлорид аммония, $NH_4Cl$	3.0	0.99

лия с образованием реакционных ячеек большого размера не происходит (рис. 5, в). Следовательно, разбавление исходного сплава азотированным ферросилицием препятствует коагуляции частиц в зоне горения, что ведет к увеличению скорости горения и глубины превращения (см. рис. 4).

Использование в качестве добавки галогидных солей аммония также приводит к увеличению глубины превращения (табл. 1). В присутствии газифицирующихся солей аммония интенсифицируется синтез нитрида кремния через образование промежуточных продуктов, таких как тетрагидрид, тетрафторид и димид кремния. В соответствии с данными [3] в присутствии солей аммония аморфный нитрид кремния образуется уже при температуре  $1000^\circ C$ , а при  $1200^\circ C$  кристаллизуется с образованием  $\alpha-Si_3N_4$ . Таким образом, до начала плавления эвтектики  $FeSi_2-Si$  ( $1206^\circ C$ ) в образце уже присутствует нитрид кремния, синтезированный по низкотемпературному механизму. Присутствие тугоплавкого нитрида кремния сдерживает коагуляцию частиц исходного ферросилиция, препятствуя тем самым увеличению размера частиц, входящих в зону реакции. Другими словами, введение солей аммония способствует уменьшению фильтрационных затруднений, что ведет к увеличению глубины превращения.

Введение в исходную шихту  $1\%$   $MgF_2$  расширяет пределы горения ферросилиция по давлению до  $0.4$  МПа (минимальное давление, при котором наблюдается горение без  $MgF_2$ , —

$1$  МПа). Активизация процесса азотирования в этом случае связана с высокой «протравливающей» способностью фторидов щелочных и щелочно-земельных металлов, что ведет к удалению оксидной пленки с поверхности реагирующих частиц.

Таким образом, в результате проведенных исследований были определены оптимальные условия синтеза и получен азотированный ферросилиций, состоящий только из нитрида кремния и железа. В процессе кислотного обогащения продуктов горения в растворах соляной кислоты железо переходило в раствор, а нитрид кремния, устойчивый в кислотах, выделялся в виде дисперсного порошка белого цвета с сероватым оттенком. Удельная поверхность порошка зависела от условий синтеза и изменялась в пределах  $2.0 \div 10.2$  м<sup>2</sup>/г. Остаточное содержание железа в нем составляло  $0.05\%$ . Частицы нитрида кремния обладают ярко выраженной анизотропией формы (рис. 6) и представляют собой нитевидные кристаллы.

## О СТАДИЙНОСТИ АЗОТИРОВАНИЯ ФЕРРОСИЛИЦИЯ

Основные представления о механизме горения кремния в азоте изложены в работах [1, 2]. В соответствии с ними горение кремния в азоте осложняется низкой температурой диссоциации нитрида кремния и плавлением кремния в зоне прогрева, влияющими в конечном счете на фазовый состав продуктов горения.

Можно ожидать, что механизм азотирования сплава  $Fe-Si$  будет отличаться от механизма азотирования кремния, поскольку индивидуальные компоненты сплава взаимодействуют друг с другом и образуют ряд силицидов ( $Fe_3Si$ ,  $Fe_5Si_3$ ,  $FeSi$  и  $FeSi_2$ ), которые обладают различной термической устойчивостью, температурой плавления и, возможно, различной скоростью взаимодействия с азотом.

Для выявления характерных стадий взаимодействия ферросилиция с азотом был исследован процесс азотирования этого сплава в трубчатой печи при заданной температуре. Для сравнения в этих же условиях исследовалось азотирование кремния. Исследование фазового состава продуктов азотирования при различных температурах (табл. 2) показало, что процесс азотирования ферросилиция и кремния начинается при различных температурах.

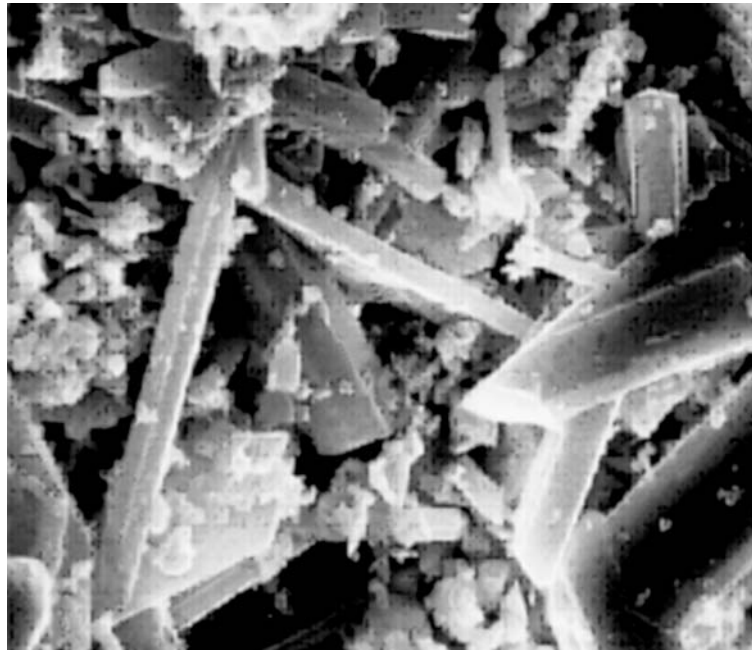
Рис. 6. Микроструктура нитрида кремния ( $p = 4$  МПа,  $\times 5\,000$ )

Таблица 2

Фазовый состав продуктов азотирования кремния и ферросилиция

$T, ^\circ\text{C}$	Фазовый состав		$m$	
	Si	ФС-75	Si	ФС-75
—	Si	FeSi <sub>2</sub> , Si	—	—
900	Si	FeSi <sub>2</sub> , Si, сл. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	—	0.01
1 000	Si	FeSi <sub>2</sub> , Si, $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	—	0.05
1 200	Si, $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	FeSi <sub>2</sub> , Si, $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.18	0.3
1 300	Si, $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , сл. $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	FeSi <sub>2</sub> , $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , сл. $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Si	0.38	0.6
1 350	$\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (80 %), $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (20 %), Si	$\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ( $\approx 90$ %), $\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ( $\approx 10$ %), FeSi <sub>2</sub> , FeSi, Si	0.5	0.75

Примечание. Время азотирования в трубчатой печи 120 мин.

Уже при  $900 \div 1\,000$  °С в продукте азотирования ферросилиция методом химического анализа обнаружен связанный азот. Образование нитрида кремния при азотировании ферросилиция при низких температурах можно объяснить фазовым переходом лебоита. Высокотемпературный  $\alpha$ -лебоит эвтектоидно распадается на низкотемпературный  $\beta$ -лебоит, близкий по составу к FeSi<sub>2</sub> и Si. Выделившийся в результате реакции кремний не имеет оксидной пленки и взаимодействует с азотом с образованием нитрида кремния по твердофазному механизму. В отличие от сплава, результаты рентге-

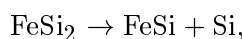
нофазового и химического анализов продуктов азотирования кремния свидетельствуют о том, что в этой области температур взаимодействие кремния с азотом не наблюдается.

В диапазоне температур  $1\,200 \div 1\,300$  °С происходит образование эвтектики FeSi<sub>2</sub>—Si и процесс азотирования ускоряется из-за реакции азота и кремния, находящегося в эвтектическом расплаве. С образованием жидкой фазы удаляются оксидные пленки и кремний переходит в газовую фазу в виде монооксида кремния.

Кроме того, кремний испаряется из эвтектического расплава и образует нитрид крем-

ния в газовой фазе [8] по реакции  $\text{Si}_{gas} + \text{N}_2 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$ . Так как взаимодействие в жидкой и газовой фазах протекает интенсивнее, чем в твердой, то и скорость азотирования ферросилиция выше, чем скорость азотирования кремния в этом температурном диапазоне (см. табл. 2).

Результаты исследования фазового состава продуктов азотирования ферросилиция позволяют полагать, что до  $1350^\circ\text{C}$  степень азотирования определяется количеством свободного кремния, а дисилицид железа не взаимодействует с азотом. Лишь свыше  $1350^\circ\text{C}$  происходит его диссоциация по схеме



о чем свидетельствует появление моносилицида железа в продуктах азотирования.

Таким образом, результаты исследований процесса азотирования ферросилиция в изотермических условиях показали, что присутствие железа в сплаве в виде  $\text{FeSi}_2$  снижает температуру начала взаимодействия кремния с азотом, ускоряет процесс образования нитрида кремния в диапазоне исследуемых температур (до  $1350^\circ\text{C}$ ), а сам процесс является многостадийным.

Для выяснения температуры, при которой начинается азотирование ферросилиция, проведен ДТА-ТГ-анализ исходного ферросилиция в среде азота. В интервале температур  $25 \div 1000^\circ\text{C}$  на кривой ДТА наблюдается широкий эндотермический эффект, который может быть обусловлен изменением теплоемкости  $\alpha$ -лебоита при нагревании. Минимум эндотермического пика соответствует интервалу температур  $900 \div 940^\circ\text{C}$ , после которого начинается пологий экзотермический подъем на кривой ДТА, которому соответствует прирост массы на кривой ТГ.

Наличие экзотермического подъема при температуре  $940 \div 1000^\circ\text{C}$ , вероятно, обусловлено экзотермическим взаимодействием азота и кремния, который выделяется в результате эвтектоидного разложения  $\alpha$ -лебоита. В соответствии с диаграммой состояния  $\alpha$ -лебоит при температуре около  $918^\circ\text{C}$  претерпевает фазовое превращение, приводящее к образованию низкотемпературной модификации ( $\beta$ -лебоит) и выделению кремния. Выделяющийся активный кремний, не имеющий оксидной пленки, взаимодействует с азотом с образованием нитрида кремния.

Таким образом, можно считать, что температура начала реакции азотирования ферросилиция соответствует температуре фазового перехода  $\alpha$ -лебоит  $\rightarrow$   $\beta$ -лебоит.

Стадии взаимодействия ферросилиция с азотом, характерные для изотермических условий в интервале температур  $900 \div 1350^\circ\text{C}$ , вероятно, будут иметь место и при азотировании ферросилиция в режиме горения. Кроме того, при температуре выше  $1350^\circ\text{C}$  происходит дальнейшая диссоциация силицидов железа, которая сопровождается выделением кремния и образованием бедного по содержанию кремния силицида железа. Как правило, при горении ферросилиция без разбавления в продуктах горения (по результатам РФА) присутствуют силициды железа различного состава:  $\text{FeSi}$ ,  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , что свидетельствует о незавершенности диссоциации силицидов железа. При разбавлении исходной шихты процесс диссоциации завершается, силициды постепенно разлагаются на кремний и железо, а продукты горения в этом случае содержат только нитрид кремния и  $\alpha$ -железо.

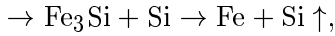
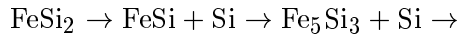
В области высоких температур возможна диссоциация нитрида кремния. Измерения максимальной температуры горения показали, что при горении ферросилиция, разбавленного азотированным ферросилицием, температура горения зависит от условий синтеза и достигает  $1850 \div 2100^\circ\text{C}$ . Полученные значения согласуются с данными работы [1], где показано, что определяющей температурой горения кремния в азоте является температура диссоциации нитрида кремния, которая не зависит от разбавления, а зависит от давления азота и изменяется от  $1930^\circ\text{C}$  при  $p = 6$  МПа до  $2130^\circ\text{C}$  при  $p = 50$  МПа.

Таким образом, процесс азотирования ферросилиция в режиме горения является многостадийным и в интервале температур от  $900^\circ\text{C}$  до температуры горения параллельно или последовательно осуществляются следующие превращения:

$900 \div 1200^\circ\text{C}$  — эвтектоидное разложение  $\alpha$ -лебоита и азотирование выделившегося кремния;

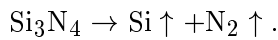
$1200 \div 1350^\circ\text{C}$  — плавление эвтектик, образование расплава силицидов железа и кремния; азотирование происходит за счет взаимодействия свободного кремния с азотом;

выше  $1350^\circ\text{C}$  — начало диссоциации силицидов железа по схеме



на данном этапе процесс азотирования определяется взаимодействием азота и кремния, образовавшегося в результате диссоциации силицидов;

в высокотемпературной области возможна диссоциация нитрида кремния по реакции



### ВЫВОДЫ

- Исследованы закономерности горения ферросилиция в азоте. Изучено влияние основных параметров синтеза на фазовый состав продуктов горения. Показано, что введение в исходный сплав конечного продукта или солевых добавок приводит к увеличению глубины превращения ферросилиция.

- Присутствие железа в виде  $\text{FeSi}_2$  снижает температуру начала взаимодействия кремния с азотом, ускоряет процесс образования нитрида кремния в диапазоне исследуемых температур. Температура начала азотирования ферросилиция совпадает с температурой фазового перехода  $\alpha$ -лебоит  $\rightarrow$   $\beta$ -лебоит.

- В зависимости от температуры горения последовательно или параллельно могут протекать различные, характерные для данной температуры стадии азотирования. Активное взаимодействие силицидов железа с азотом наблюдается при температурах выше 1350 °С.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мукасьян А. С., Мартыненко В. М., Мержанов А. Г. и др. О механизме и закономерностях горения кремния в азоте // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 12, № 5. С. 43–49.
2. Мукасьян А. С., Степанов Б. В., Гальченко Ю. А., Боровинская И. П. О механизме структурообразования нитрида кремния при горении кремния в азоте // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 1. С. 45–52.
3. Zakorzhevskii V. V., Borovinskaya I. P. Some regularities of  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  synthesis in a commercial SHS reactor // Intern. J. SHS. 2000. V. 9, N 2. P. 171–191.
4. Чухломина Л. Н., Зиатдинов М. Х., Максимов Ю. М. Получение нитридов из ферросплавов, азотированных в режиме горения // Журн. прикл. химии. 2000. Т. 73, № 9. С. 1428–1433.
5. Чухломина Л. Н., Зиатдинов М. Х., Максимов Ю. М., Сидорова Е. В. Получение нитрида ниобия из азотированного СВС-методом феррониобия // Цв. металлургия. 2002. № 1. С. 57–62.
6. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / Под ред. О. А. Банных. М.: Металлургия, 1986.
7. Анализ азотсодержащих соединений в сплавах железа / И. Е. Лев, В. В. Покидышев, Б. Г. Лазарев, Н. С. Мицкевич. М.: Металлургия, 1987.
8. Molison A. J. Reaction-bonded silicon nitride its formation and properties // J. Mater. Sci. 1979. V. 14, N 5. P. 1017–1052.

*Поступила в редакцию 1/IV 2005 г.*