

*Д-р техн. наук В. В. Примаченко,  
канд. техн. наук Л. А. Бабкина, канд. техн. наук Л. К. Савина,  
Э. Л. Карякина, Л. М. Щербак, А. С. Тинигин  
(АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного», г. Харьков, Украина)*

## **Исследование влияния количества добавки «Carbonxide» на свойства карбидкремниевых огнеупоров на нитридкремнийсодержащей связке после обжига при температуре 1450 °С в среде газообразного азота**

### **Введение**

Широкое применение за рубежом и на предприятиях Украины (машиностроительной, фарфорофаянсовой и других отраслей промышленности) нашли карбидкремниевые огнеупоры, изготавливаемые на основе тугоплавких бескислородных соединений путем реакционного спекания в среде газообразного азота, характеризующиеся высокими механической прочностью, абразивоустойчивостью, термостойкостью, теплопроводностью при высоких температурах службы [1—3].

При изготовлении реакционноспеченных карбидкремниевых огнеупоров наиболее предпочтительным является такой процесс синтеза, который ведет к максимальной полноте реакции и минимальному содержанию в конечном продукте остаточного кремния [1, 2, 4]. Кинетика образования нитридсодержащих фаз при азотировании кремния зависит как от режима термообработки, так и от вида и количества вводимых добавок [5—9].

В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана технология производства реакционноспеченных карбидкремниевых огнеупоров на нитридкремнийсодержащей связке методом полусухого прессования, предусматривающая использование карбида кремния черного, кремния, добавок ферросилиция и нефтяного кокса, а также временного связующего (мелассы) [10—13]. Разработанная технология позволяет изготавливать, за счет использования ферросилиция и нефтяного кокса, крупногабаритные, толщиной более 50 мм, огнеупоры с низким содержанием остаточного кремния, высокими показателями свойств, с равномерной микроструктурой и без черной сердцевины.

При получении карбидкремниевых огнеупоров на нитридкремнийсодержащей связке эффективной является, как отмечено выше, добавка ферросилиция [13]. Начиная с 1000—1100 °С, она способствует образованию нитридных фаз (нитрид кремния, оксинитрид кремния) по жидкофазному механизму (жидкость — твердое вещество), т. е. с 1000—1100 °С процесс фазообразования активизируется и проходит более интенсивно и полнее.

При наличии ферросилиция образуются легкоплавкие соединения (жидкая фаза), которые, насыщаясь азотом, проникают по порам, в том числе и по дополнительно образующимся в процессе выгорания нефтяного кокса, вглубь изделия. Жидкая фаза является транспортером азота к кремнию и обеспечивает более тесный контакт азота с частицами кремния, что способствует началу образования нитридсодержащих фаз при более низких температурах и более полному прохождению реакции нитридообразования.

Наряду с добавкой ферросилиция могут быть и другие добавки, обеспечивающие получение карбидкремниевых огнеупоров на нитридкремнийсодержащей связке с низким содержанием остаточного кремния, высокими показателями свойств, равномерной микроструктурой и без черной сердцевины. Так, компания Refrasud International S.R.L. (Италия) [14] предлагает специальную добавку под названием «Carbonxide», введение которой в состав ряда огнеупорных изделий должно обеспечивать, по данным фирмы, улучшение их служебных свойств. Представляло интерес исследовать влияние данной добавки на свойства реакционноспеченных карбидкремниевых огнеупоров на нитридкремнийсодержащей связке и установить возможность замены, в случае необходимости, добавок ферросилиция и нефтяного кокса, используемых при изготовлении вышеуказанных огнеупоров, добавкой «Carbonxide». В данной статье приведены результаты этих исследований.

## Экспериментальная часть

Для проведения исследований использовали следующие сырьевые материалы: кремний по ТУ У 6-02-50-23-87 фракции < 80 мкм ПАО «Кремнийполимер», г. Запорожье; кремний фракции < 1 мм (Китай), карбид кремния черный марки 54С по ТУ У 24.1-00222226-059-2006 фракций в ряду F 12—F 90 (с размером зерна 1,6—0,16 мм) с содержанием основных фракций 90 % ПАО «Запорожский абразивный комбинат»;

ферросилиций по ГОСТ 4127—2002 фракции < 1 мм; нефтяной (нефтехимический) кокс марки КС-8 по ТУ У 00152230.020-97; меласса свекловичная по ДСТУ 3696-98 (ГОСТ 30561—98) плотностью 1,34—1,35 г/см<sup>3</sup>; газообразный азот повышенной чистоты по ДСТУ ГОСТ 9293—2009 (ИСО 2435-73); добавка «Carbonxide» производства компании Refrasud International S.R.L (Италия).

Химический состав основных исходных материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав основных исходных материалов  
(по данным АО «УкрНИИО имени А.С. Бережного)

Наименование материала	Содержание, мас. %							
	$\Delta m$	Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO/ MgO	SiC/ C <sub>св</sub>
Карбид кремния фракций 1,6—0,16 мм	—	0,40	0,04	0,43	0,40	—	—	98,50/ 0,23
Кремний фракции < 80 мкм	—	98,35	0,42	0,30	0,70	0,23	—	—
Кремний фракции < 1 мм	—	98,83	0,41	0,05	0,48	0,01	0,23	—
Ферросилиций фракции < 1 мм	Не опр.	75,00*	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Добавка «Carbonxide»	2,57	—	86,40	4,11	2,26	3,50	1,29/ 0,08	Na <sub>2</sub> O — 0,19 K <sub>2</sub> O — 0,17

\* По данным сертификата.

Таблица 2

Размер частиц дисперсных материалов

Наименование материала	Размер частиц, мкм	
	максимальный	преобладающий
Карбид кремния вибромолотый	100	8—40
Кремний фракции < 80 мкм (товарный)	80	4—20
Кремний вибромолотый	30	4—8
Ферросилиций вибромолотый	100	40
Нефтяной кокс вибромолотый	100	40
Добавка «Carbonxide» (товарная)	60	4—10

Как видно из табл. 1, оба вида кремния, независимо от изготовителя этого материала, имеют практически одинаковый химический состав.

Часть карбида кремния фракций 1,6—0,16 мм и в полном объеме кремний фракции < 80 мкм, дисперсную добавку «Carbonxide» использовали в товарном виде, а часть карбида кремния и в полном объеме кремний фракции < 1 мм, ферросилиций фракции < 1 мм и нефтяной кокс измельчали в вибромельнице до дисперсного состояния.

Размер частиц всех дисперсных материалов приведен в табл. 2.

Исследование влияния на полноту прохождения реакции синтеза нитрида кремния добавки «Carbonxide» (и для сопоставления также без добавок и с комбинированной добавкой, состоящей из ферросилиция и нефтяного кокса) проводили на образцах двух видов: первый вид образцов состоял только из смесей кремния фракции < 80 мкм (товарного), соответствующих добавок и мелассы, т. е. без карбида кремния, — всего 5 реакционных смесей; второй вид образцов содержал все перечисленные выше компоненты в тех же соотношениях, а также карбид кремния, т. е. все компоненты шихты, необходимые для изготовления карбидкремниевых огнеупоров на нитридкремнийсодержащей связке, — тоже всего 5 шихт. Для выявления влияния дисперсности кремния на полноту синтеза нитрида кремния, кремний в образцах второго вида (образцах огнеупоров) был использован более дисперсный — вибромолотый с максимальным размером зерна 30 мкм.

Вещественный состав реакционных смесей приведен в табл. 3.

Таблица 3

Вещественный состав реакционных смесей

Наименование компонентов	Смесь, №				
	1	2	3	4	5
Кремний фракции < 80 мкм (товарный)	100	100	100	100	100
Ферросилиций вибромолотый (сверх 100 %)	—	7,5	—	—	—
Нефтяной кокс вибромолотый (сверх 100 %)	—	3,5	—	—	—
Добавка «Carbonxide» (сверх 100 %) (товарная)	—	—	7,5	10	12,5
Меласса плотностью 1,32—1,34 г/см <sup>3</sup> (сверх 100 %)	3	3	3	3	3

Вещественный состав шихт для изготовления образцов карбидкремниевых огнеупоров на нитридкремнийсодержащей связке приведен в табл. 4.

Таблица 4

**Вещественный состав шихт для изготовления образцов карбидкремниевых огнеупоров на нитридкремнийсодержащей связке**

Наименование компонентов	Шихта, №				
	1'	2'	3'	4'	5'
Карбид кремния фракции 1,6—0,16	70	70	70	70	70
Карбид кремния вибромолотый	10	10	10	10	10
Кремний вибромолотый	20	20	20	20	20
Ферросилиций вибромолотый (сверх 100%)	—	1,5	—	—	—
Нефтяной кокс вибромолотый (сверх 100%)	—	0,7	—	—	—
Добавка «Carbonxide» (сверх 100%)	—	—	1,5	2	2,5
Меласса плотностью 1,32—1,34 г/см <sup>3</sup> (сверх 100%)	8	8	8	8	8

Образцы из реакционных смесей 1—5 диаметром 20 и высотой 20 мм прессовали из полусухих масс при удельном давлении 30 Н/мм<sup>2</sup>.

Образцы огнеупоров с размерами 230×115×50 мм из шихт 1'—5' прессовали из полусухих масс на фрикционном прессе опытного производства института.

Образцы обоих видов обжигали одновременно в одной и той же периодической печи опытного производства института при температуре 1450 °С в среде газообразного азота и в засыпке из нефтяного кокса.

Из обожженных образцов 230×115×50 мм вырезали кубы с ребром 40 мм для определения их свойств.

Определение химических и физико-механических свойств образцов проводили согласно действующим ГОСТам по утвержденным методикам. Определение массовой доли карбида кремния выполняли по ГОСТ 10153—70, предел прочности при сжатии — по ГОСТ 4071.1—94, кажущуюся плотность и открытую пористость — по ДСТУ ISO 5017:2014. Изменение массы образцов (прирост) определяли путем взвешивания образцов до и после обжига.

Петрографические исследования термообработанных образцов выполняли на полированных шлифах на оптическом микроскопе МИН-8 по методикам, разработанным и действующим в АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного».

Электронномикроскопический анализ исследуемых материалов был выполнен на электронном микроскопе ЭМВ-100АК

по следующим методикам: метод суспензий, метод реплик (двух-ступенчатые, самооттененные, с извлечением), метод электронографии и микродифракции.

## Результаты и их обсуждение

После обжига при температуре 1450 °С в среде газообразного азота образцы из реакционных смесей характеризовались показателями свойств, которые приведены в табл. 5.

Таблица 5

Показатели свойств обожженных образцов из реакционных смесей

Наименование свойств	Показатели свойств образцов из смесей, №				
	1	2	3	4	5
Массовая доля, % : Si <sub>ост.</sub>	0,55	0,42	0,53	0,50	0,43
N	27,5	28,1	27,6	27,8	28,0
Предел прочности при сжатии, Н/мм <sup>2</sup>	150	154	158	168	176
Прирост массы, %	26,3	31,6	27,5	30,5	32,8

Как видно из табл. 5, количество остаточного кремния в образцах из всех реакционных смесей является низким (0,42—0,55 %), что характеризует практически полное прохождение реакций образования кремнийсодержащих соединений в них (на 99,45—99,57 %) и что все опробованные добавки не оказывают существенного влияния на содержание в образцах остаточного кремния, хотя незначительное его снижение наблюдается (от 0,55 % в образцах без добавок до 0,42—0,53 % в образцах с добавками). Самое низкое количество остаточного кремния содержится в образцах с комбинированной добавкой ферросилиция и нефтяного кокса (0,42 %). Содержание азота во всех образцах также является практически одинаковым и составляет 27,5—28,1 %. Прирост массы для всех образцов тоже является близким и составляет 26,3—32,8 %, но тенденция к увеличению прироста массы с 26,3 % в образцах без добавок до 27,5—32,8 % в образцах с добавками имеется. Очевидно, что прирост массы в принятых условиях обжига произошел не только за счет азота, но и за счет углерода нефтяного кокса, являющегося как засыпкой, так и компонентом в образцах из смеси № 2. Близкие значения прироста массы объясняются еще и близкими значениями атомных весов азота и углерода (14 и 12 соответственно). Пока-

затели предела прочности при сжатии всех образцов являются высокими и близкими по своим значениям (150—176 Н/мм<sup>2</sup>).

Проведены электронномикроскопические исследования образца из реакционной смеси состава № 5 после обжига. На рис. 1—7 приведены электронномикроскопические фотографии отдельных участков этого образца, которые в целом наглядно характеризуют его микроструктуру. Электронномикроскопическими исследованиями установлено, что основная фаза исследуемого образца представлена нитридом кремния, которая формируется в микроблочную структуру (рис. 1).

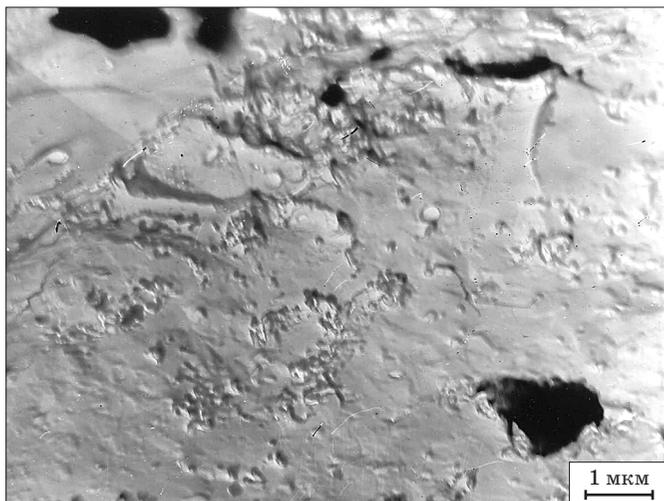


Рис. 1. Микроструктура образца из реакционной смеси № 5

В процессе обжига в среде газообразного азота зерна кремния претерпевают изменения (рис. 2), вокруг них образуется неровная стеклообразная оболочка из продуктов разложения зерна кремния, переходящая в несовершенную структуру мелких зародышей новообразований ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_2\text{ON}_2$ ,  $\beta$ -сиалон) размером меньше микрона.

Помимо основной фазы ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), в образце наблюдаются новообразования  $\beta$ -сиалона и  $\beta$ -SiC (последнего в виде тонкой, мельчайшей сетки) (рис. 3). Также в образце фиксируются участки образующегося нитрида алюминия (AlN) в виде слоистых удлинённых частиц, являющегося одним из составляющих компонентов  $\beta$ -сиалона, и участки непрореагировавшего  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , который составляет, как видно из табл. 1, преимущественную часть «Carbonxide» (рис. 4).

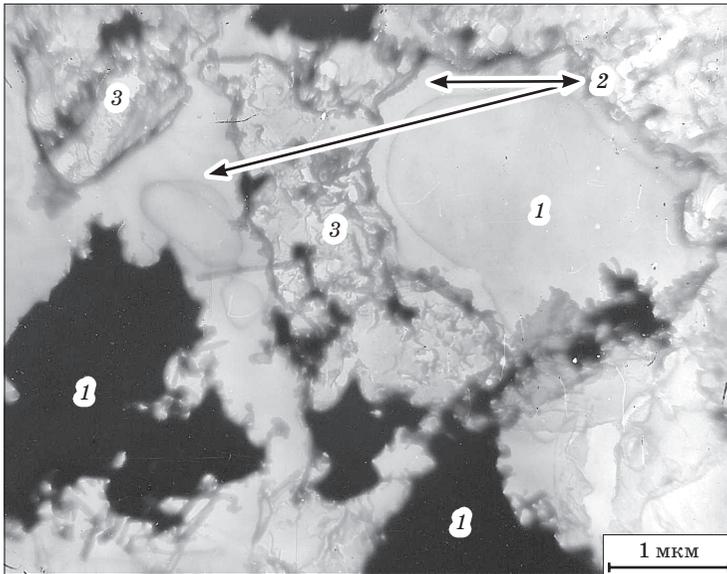


Рис. 2. Микроструктура образца из реакционной смеси состава № 5:  
 1 — Si (черные частицы на рисунке извлечены из образца методом реплик);  
 2 — стеклообразная оболочка; 3 — новообразования ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_2\text{ON}_2$ ,  $\beta$ -сиалон)

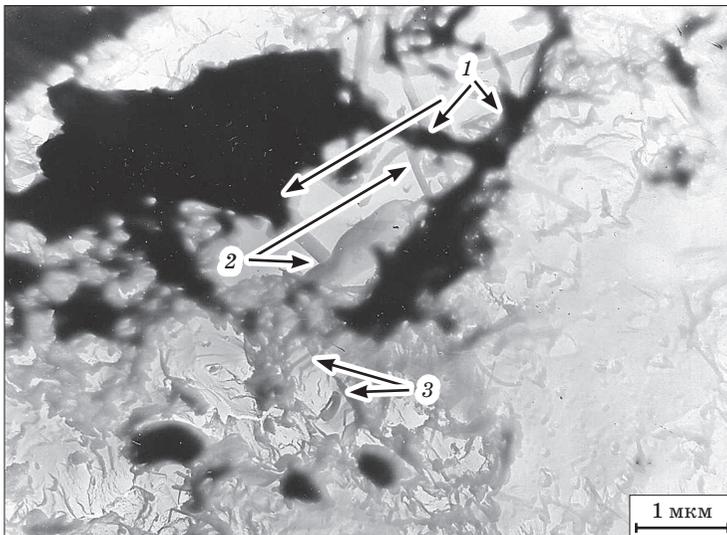


Рис. 3. Микроструктура образца из реакционной смеси состава № 5:  
 1 —  $\beta$ -сиалон; 2 —  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 3 —  $\beta$ -SiC

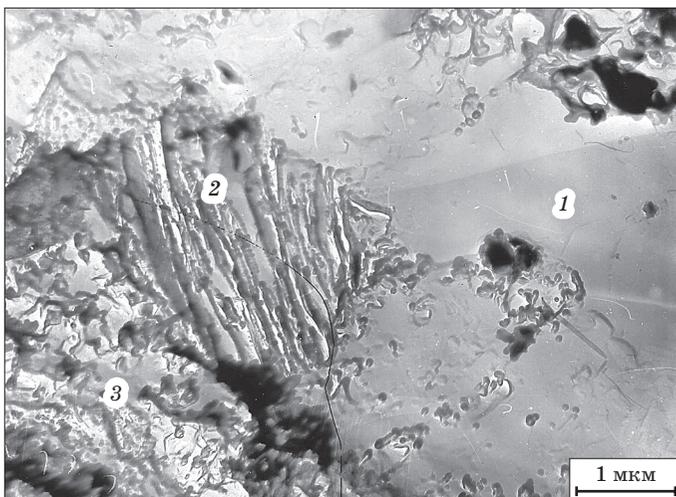


Рис. 4. Микроструктура образца из реакционной смеси состава № 5:  
 1 —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 2 —  $\text{AlN}$ ;  
 3 — связка, состоящая из смешанных несовершенных новообразований

Наиболее интенсивное образование новых фаз идет в поровом пространстве (рис. 5). В порах наблюдается образование волокон нитрида кремния сечением от 0,06 до 0,2 мкм. Наряду с монокристаллическими волокнами формируются полуморфные волокна нитрида кремния, образующие спутанные структуры. Кроме того, в образце на волокнах нитрида кремния возникают вторичные образования — хорошо сформированные сиалоновые фазы, которые являются результатом дефектной структуры самих волокон. Волокнистые частицы из нитрида кремния с сиалоновыми фазами, присутствующие в поровом пространстве, срстаются и заполняют пору, увеличивая при этом прочность образца.

Образование  $\beta$ -сиалона происходит не только в поровом пространстве, но и в матрице образца на границе между фазами кремния и нитрида кремния. На рис. 6 показан фрагмент, извлеченный из исследуемого материала, где в качестве новообразований, кроме нитрида кремния, присутствует  $\beta$ -сиалон в виде плотных зерен размером 0,9—1,3 мкм с признаками кристаллографической огранки, а также удлиненные частицы  $\text{AlN}$ .

Возникающие в результате обжига новообразования способствуют созданию межблочных прослоек шириной примерно от 0,5 до 1,5 мкм, которые способствуют скреплению отдельных блоков (рис. 7).

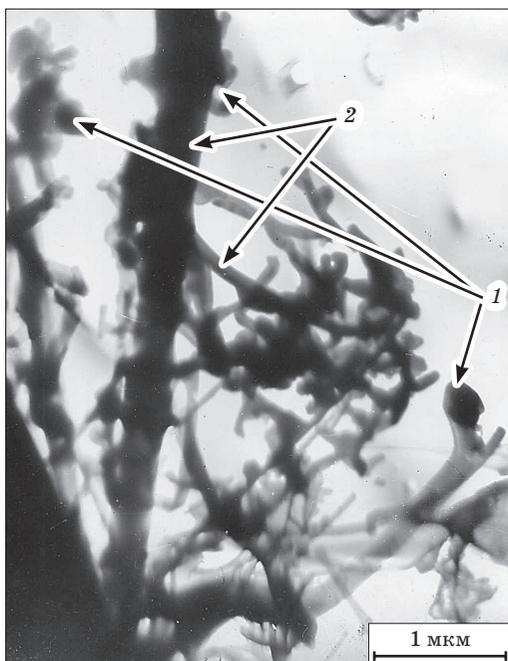


Рис. 5. Микроструктура образца из реакционной смеси состава № 5:  
1 —  $\beta$ -сиалон; 2 —  $\text{Si}_3\text{N}_4$

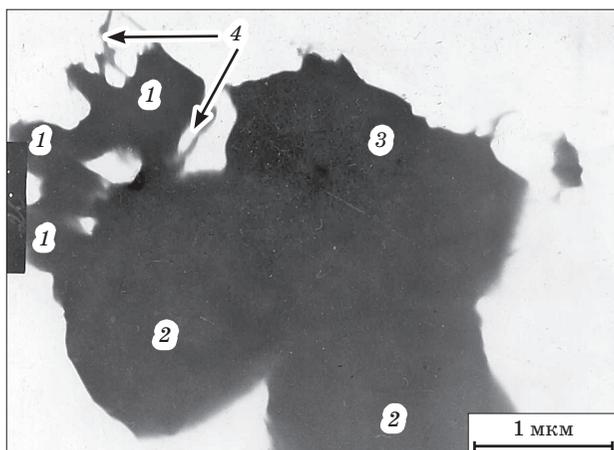


Рис. 6. Извлеченный фрагмент из межграничной области образца из реакционной смеси состава № 5:

1 —  $\beta$ -сиалон (призматические частицы хорошо сформированного сиалона);  
2 —  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 3 — Si; 4 — AlN

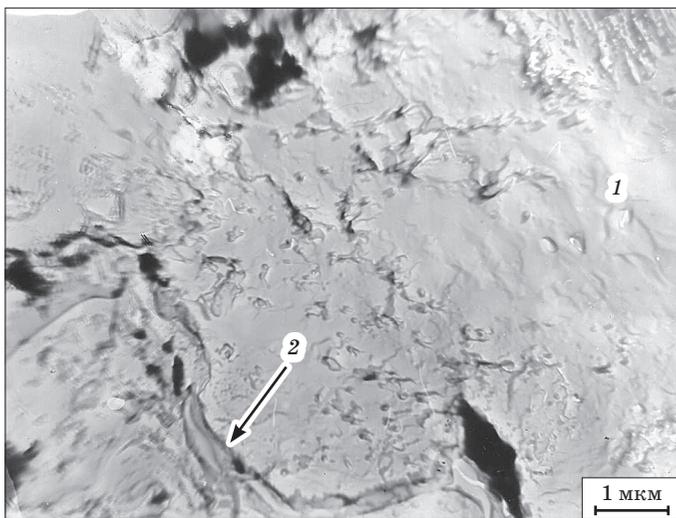


Рис. 7. Микроструктура образца из реакционной смеси № 5:  
1 —  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 2 — прослойка

Проведены исследования свойств образцов карбидкремниевых огнеупоров составов № 1' – 5' после термообработки при температуре 1450 °С в среде газообразного азота.

Показатели свойств огнеупоров приведены в табл. 6.

Таблица 6

Показатели свойств образцов огнеупоров после обжига

Наименование свойств	Показатели свойств образцов огнеупоров из шихты, №				
	1'	2'	3'	4'	5'
Массовая доля, %: SiC	71,0	71,2	70,5	70,7	71,0
Si <sub>ост.</sub>	0,50	0,42	0,48	0,45	0,41
N	7,00	7,20	7,10	7,16	7,15
Открытая пористость, %	15,60	15,20	16,40	16,5	16,80
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	2,58	2,60	2,59	2,59	2,58
Предел прочности при сжатии, Н/мм <sup>2</sup>	180	197	190	195	216
Прирост массы, %	3,10	3,50	3,50	3,52	3,60
Изменение линейных размеров, % (+) рост; (-) усадка)	+2,07	+0,85	+1,04	+0,32	-0,29

Температура деформации под нагрузкой 0,2 Н/мм<sup>2</sup> образцов всех составов > 1700 °С.

Сопоставляя данные по содержанию остаточного кремния (0,42—0,55 %, табл. 5) в образцах из реакционных смесей, в которых использован кремний с максимальным размером частиц 80 мкм и преобладающим 4—20 мкм, с данными по кремнию остаточному (0,42—0,50 %, табл. 6) в образцах из шихт огнеупоров (в них использован значительно более дисперсный кремний — максимальный размер частиц 30 мкм, преобладающий — 4—8 мкм), можно сделать вывод, что принятая в наших исследованиях дисперсность кремния не оказывает заметного влияния на полноту прохождения реакций образования кремнийсодержащих соединений в образцах.

Из табл. 6 также видно, что все образцы имеют высокие показатели предела прочности при сжатии (180—216 Н/мм<sup>2</sup>) и кажущейся плотности (2,58—2,60 г/см<sup>3</sup>) и низкие — открытой пористости (15,5—16,8 %). Значения открытой пористости образцов с добавкой «Carbonxide» на 1,2—1,6 % выше по сравнению с образцами с комбинированной добавкой ферросилиция и нефтяного кокса. Прочность образцов с добавками (как с комбинированной, состоящей из ферросилиция и нефтяного кокса, так и с добавкой «Carbonxide», взятой в разных количествах (1,5; 2,0 и 2,5 %)) является более высокой (190—216 Н/мм<sup>2</sup>), чем образцов без добавок (180 Н/мм<sup>2</sup>). Образцы из составов 1'—4' имеют линейный рост в обжиге (0,32—2,07 %) и только образцы из состава 5' (с добавкой 2,5 % «Carbonxide») имеют линейную усадку 0,29 %, что свидетельствует об их лучшей спекаемости за счет высокого содержания в «Carbonxide» примесных оксидов (> 11 %, табл. 1), и их более высокая, хотя и незначительно, прочность (216 Н/мм<sup>2</sup>) объясняется лучшей спекаемостью образцов.

Проведенные петрографические исследования образца состава № 5' показали, что в образце выделяются крупные участки зернистого заполнителя ( $\alpha$ -SiC) и тонкозернистая связующая масса, состоящая в основном из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, в небольшом количестве наблюдаются синоит Si<sub>2</sub>N<sub>2</sub>O,  $\beta$ -сиалон,  $\beta$ -SiC, AlN и непрореагировавший Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, дисперсные частицы  $\alpha$ -SiC и Si<sub>ост.</sub> (рис. 8).

Контакты заполнитель—связка в большинстве случаев плотные, редкие трещины на контакте до 0,1 мм (преобладающая ширина 0,04—0,08 мм). Поры в связке мелкие — 4—15 мкм (макс. 40 мкм), изометричной и неправильной формы.

С целью проверки наличия черной сердцевины в изделиях толщиной более 50 мм изготовлены изделия толщиной 80 мм с 2,5 % добавки «Carbonxide». В обожженных при 1450 °С

в среде газообразного азота изделиях черная сердцевина отсутствует. Свойства этих изделий являются аналогичными свойствам образцов, приведенным в табл. 6.

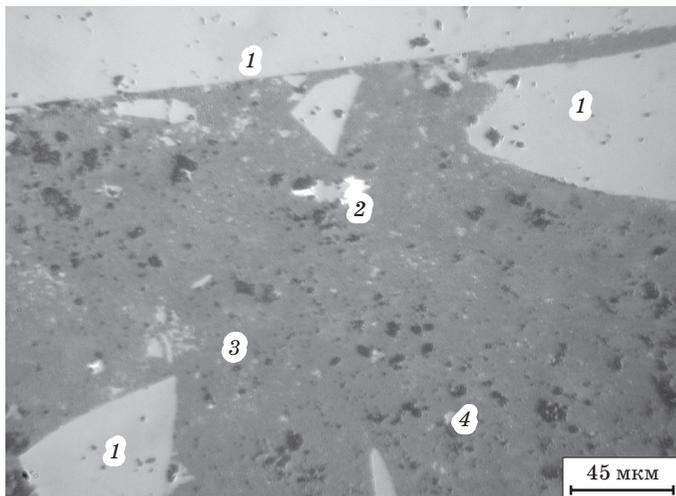


Рис. 8. Микроструктура карбидкремниевго образца состава № 5':  
1 —  $\alpha$ -SiC; 2 — Si; 3 — связка ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ ,  $\beta$ -сиалон,  $\beta$ -SiC, AlN); 4 — пора

Полученные результаты в целом свидетельствуют о том, что материал «Carbonxide» может быть использован, в случае необходимости, наряду с комбинированной добавкой ферросилиция и нефтяного кокса.

## Заклучение

Исследовано влияние количества добавки «Carbonxide» на свойства прессованных карбидкремниевых изделий на нитридкремнийсодержащей связке.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что наряду с добавками ферросилиция и нефтяного кокса при изготовлении карбидкремниевых изделий на нитридкремнийсодержащей связке толщиной более 50 мм может быть использована добавка «Carbonxide».

Использование добавки «Carbonxide» взамен добавок ферросилиция и нефтяного кокса в составе шихты огнеупора способствует созданию микропористой структуры материала и образованию связки многофазового состава ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\beta$ -сиалон,  $\beta$ -SiC, AlN), что в целом увеличивает прочность огнеупора.

Изделия с добавкой «Carbonxide» в количестве 2,5 % (сверх 100 %) характеризуются следующими показателями физико-химических свойств: массовая доля: SiC — 71,0 %, Si<sub>ост.</sub> — 0,41 %, N — 7,15 %; предел прочности при сжатии — 216,0 Н/мм<sup>2</sup>, открытая пористость — 16,8 %, кажущаяся плотность — 2,58 г/см<sup>3</sup>, температура деформации под нагрузкой 0,2 Н/мм<sup>2</sup> — > 1700 °С и соответствуют требованиям технических условий для марки ККНК.

### Библиографический список

1. Кайнарский И. С., Дегтярева Э. В. Карборундовые огнеупоры. Х. : Metallurgizdat, 1963. 252 с.
2. Гнесин Г. Г. Карбидкремниевые материалы. М. : Metallurgiya, 1977. 216 с.
3. Огнеупоры на основе карбида кремния на Волжском абразивном заводе / Т. П. Бондарчук и др. *Новые огнеупоры*. 2011. № 3. С. 20.
4. Стрелов К. К. Теоретические основы технологии огнеупоров. М. : Metallurgiya, 1985. 480 с.
5. Самсонов Г. В. Нитриды. К. : Наук. думка, 1969. 380 с.
6. Андриевский Р. А., Спивак И. И. Нитрид кремния и материалы на его основе. М. : Metallurgiya, 1984. 137 с.
7. Самсонов Г. В., Кулик О. П., Полицук В. С. Получение и методы анализа нитридов. К. : Наук. думка, 1978. 318 с.
8. Kita Hideki, Iizuka Tateoki, Osumi Kazuo, Hirai Takene. Микроструктура Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с диспергированными в нем частицами Fe<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>, полученного реакционным спеканием. *Nippon seramikusu kyokai gakujiutsu ronbunshi = J. Ceram. Soc. Jap.* 2003. Vol. 111. № 1289. P. 59—66.
9. Косолапова Т. Я., Андреева Т. В., Бартницкая Т. С. Неметаллические тугоплавкие соединения. М. : Metallurgiya, 1985. 224 с.
10. Вибролитые сложные карбидкремниевые изделия со связкой из нитрида кремния / В. В. Примаченко и др. *Новые огнеупоры*. 2006. № 4. С. 50, 51.
11. Федорук Р. М., Примаченко В. В., Савина Л. К. Исследование влияния разжижающих добавок на текучесть суспензий из карбида кремния и кремния. *Зб. наук. пр. ВАТ «УкрНДІВ імені А. С. Бережного»*. Х. : Каравела, 2003. № 103. С. 58—61.
12. Стойкие огнеупоры для футеровок тепловых агрегатов производства чугуна / В. В. Примаченко и др. *Сучасні проблеми металургії: матеріали наук.-практ. конф. «Проблеми і перспективи одержання конкурентоспроможної продукції в гірничо-металургійному комплексі України»* (м. Дніпропетровськ, 24—25 жовт. 2000 р.). Дніпропетровськ : Системні технології, 2001. Т. 3. С. 463—470.
13. Влияние некоторых добавок на синтез нитрида кремния при реакционном спекании / Р. М. Федорук и др. *Вестник НТУ «ХПИ»*. Х. : НТУ «ХПИ», 2004. № 33. С. 9—16.
14. Рекламный проспект компании Refrasud International S.R.L (Италия).

### References (transliterated):

1. Kajnarskij I. S., Degtjareva Je. V. *Karborundovye ogneupory* [Carborundum refractories]. Kharkov, Metallurgizdat Publ., 1963. 252 p. (in Russian).

2. Gnesin G. G. *Karbidkremnievye materialy* [Silicon carbide materials]. Moscow, Metallurgija Publ., 1977. 216 p. (in Russian).

3. Bondarchuk T. P., Dovgal A. N., Lukin A. B., Karpova O. B., Sakadeeva O. U., Urkov A. N. Ogneupory na osnove karbida kremnija na Volzhskom abrazivnom zavode [Silicon carbide refractories at the Volga Abrasive Plant]. *Novye ogneupory* [New refractories]. 2011, no. 3, p. 20. (in Russian).

4. Strel'ov K. K. *Teoreticheskie osnovy tehnologii ogneuporov* [Theoretical basics of refractory technology]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 480 p. (in Russian).

5. Samsonov G. V. *Nitridy* [Nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1969. 380 p. (in Russian).

6. Andrievskij R. A., Spivak I. I. *Nitrid kremnija i materialy na ego osnove* [Silicon nitride and materials based on it]. Moscow, Metallurgija Publ., 1984. 137 p. (in Russian).

7. Samsonov G. V., Kulik O. P., Polishchuk V. S. *Poluchenie i metody analiza nitridov* [Preparation and analysis methods of nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 318 p. (in Russian).

8. Kita Hideki, Iizuka Tateoki, Osumi Kazuo, Hirai Takene Mikrostruktura  $\text{Si}_3\text{N}_4$  s dispergirovannymi v nem chasticami  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$ , poluchennogo reakcionnym spekaniiem [Microstructure of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  with  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  particles dispersed in it, obtained by reaction sintering]. *Nippon seramikusu kyokai gakujuutsu ronbunshi = J. Ceram. Soc. Jap.* 2003, vol. 111, no. 289, p. 59 — 66. (in English).

9. Kosolapova T. Ja., Andreeva T. V., Bartnickaja T. S. *Nemetallicheskie tugo-plavkie soedinenija* [Non-metallic refractory compounds]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 224 p. (in Russian).

10. Primachenko V. V., Fedoruk R. M., Savina L. K., Poltarak E. V., Kovalev S. B. Vibrolitnye slozhnye karbidkremnievye izdelija so svjazkoj iz nitrida kremnija [Vibro-lite composite carbide silicon products with a silicon nitride binder]. *Novye ogneupory* [New refractories]. 2006, no. 4, pp. 50, 51. (in Russian).

11. Fedoruk R. M., Primachenko V. V., Savina L. K. Issledovanie vlijanija raz-zhizhajushhij dobavok na tekuchest' suspenzij iz karbida kremnija i kremnija [Investigation of thinning additives influence on the flowing of silicon carbide and silicon suspensions]. *Zb. nauk. pr. VAT "UkrNDI Vognetryviv im. A. S. Berezhnogo"* [Coll. Sci. Proc. of the JSC "URIR named after A. S. Berezhnogo"]. Kharkov, Karavella Publ., 2003, no. 103, pp. 58—61. (in Russian).

12. Primachenko V. V., Martynenko V. V., Fedoruk R. M., Pitak N. V., Deg-tjareva L. M., Savina L. K., Horuzhij A. G. Stojkie ogneupory dlja futerovok teplovyh agregatov proizvodstva chuguna [Resistant refractories for linings of heat units for iron production]. *Suchasni problemi metalurgiji : materialni nauk.-prakt. konf. "Problemi i perspektivi oderzhannja konkurentospromozhnoyi produkciji v girnicho-metalurgijnomu kompleksu Ukraini"* [Modern problems of metallurgy : Proc. of the Sci.-Pract. Conf. "Problems and perspectives of obtaining competitive products in the mining and metallurgical complex of Ukraine", Dnipropetrovsk, 24—25 oct. 2000]. Dnipropetrovsk, Sistemni tehnologii Publ., 2001, vol. 3, pp. 463—470. (in Russian).

13. Fedoruk R. M., Savina L. K., Primachenko V. V., Karjakina Je. L., Poltarak E. V. Vlijanie nekotoryh dobavok na sintez nitrida kremnija pri reakcionnom spekanii [The effect of some additives on the synthesis of silicon nitride during reaction sintering]. *Vestnik NTU "KhPI"* [Bulletin of the NTU "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2004, no. 33, pp. 9—16. (in Russian).

14. Reklamnyj prospekt kompanii Refrasud International S.R.L (Italija). (in Russian).

*Рецензент канд. техн. наук Мишнева Ю. Е.*