

ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЬЦИДОВАННОГО ГРАФИТА

Шакирова Шухрата Мусаевича

Ташкентский государственный
технический университет имени
Ислама Каримова, (PhD) доцент.

Азизова Иномджона Кодиржоновича

Ассистент Алмалыкского
филиала Ташкентского государственного
технического университета имени Ислама Каримова

Email: azizovinomjon97@gmail.com

Аннотация

В статье рассматриваются области применения, физико-механические свойства и структурные особенности силицированного графита, полученного методом пропитки спрессованных порошков графита расплавленным кремнием при высоких температурах. Представлены результаты исследований микроструктуры, фазового состава и эксплуатационных характеристик полученного материала.

Показано, что в процессе силицирования в поверхностных слоях графита формируются карбид кремния (SiC) и свободный кремний, которые обеспечивают значительное повышение прочности, твердости и термостойкости материала. Сформировавшиеся композиционные структуры способствуют увеличению плотности, уменьшению пористости и повышению стойкости к окислению и износу.

Отмечено, что полученный силицированный графит проявляет высокую химическую и термическую стабильность, сохраняя механическую прочность при температурах до 1800 °С. Материал рекомендован к применению в узлах и деталях, работающих в агрессивных и высокотемпературных средах — в частности, в насосах, термозащитных оболочках, тиглях для плавления

металлов, а также в элементах реактивных двигателей и нагревательных установок.

Результаты исследований свидетельствуют о высокой эффективности метода силицирования при создании конструкционных углерод-керамических материалов нового поколения, способных заменить дорогостоящие импортные сплавы.

Ключевые слова: силицированный графит, карбид кремния, порошковая металлургия, микроструктура, высокотемпературные материалы, прочность, термостойкость.

Методы исследования

Для получения силицированного графита использовались порошки высокочистого графита с размером частиц 50–100 мкм и плотностью 2,1 г/см³. В качестве источника кремния применялись гранулы технически чистого кремния (99,9 %). Пропитка графитовых заготовок кремнием проводилась в вакуумной печи при температуре 1800–2000 °С в течение 1,5 часов. После пропитки образцы подвергались медленному охлаждению в контролируемой инертной атмосфере для предотвращения окисления поверхности.

Микроструктурный анализ силицированного графита выполнялся с использованием **оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)**. Для изучения фазового состава применялся **рентгенофазовый анализ (РФА)** с использованием дифрактометра типа D8 Advance (Bruker). Количественное определение фаз SiC, Si и C проводилось методом Ритвельда.

Плотность и пористость материалов определялись по **методу Архимеда**, а также газопорометрией. Для исследования механических характеристик (предел прочности при сжатии, изгибе и растяжении) использовалась испытательная машина типа **WOW 600KN**. Твердость измерялась по шкале HRC с использованием прибора **HR175DT**. Термическая обработка при нагреве проводилась в печи СНОЛ 1.6.2.5

Полученные экспериментальные данные обрабатывались статистическими методами и сопоставлялись с литературными источниками для определения закономерностей влияния условий силицирования на микроструктуру и физико-механические свойства материала.

Обсуждение

Результаты проведённых исследований показывают, что процесс силицирования графита существенно изменяет его микроструктуру и физико-механические характеристики. При взаимодействии жидкого кремния с углеродной матрицей происходит образование фаз карбида кремния (SiC) и остаточного свободного кремния, что приводит к формированию плотной композиционной структуры с улучшенной связью между зёрнами.

Микроструктурный анализ выявил наличие трёх характерных зон:

1. **Верхний поверхностный слой**, состоящий преимущественно из карбида кремния, обеспечивающего высокую твёрдость и устойчивость к окислению;
2. **Переходная зона**, где наблюдается взаимное проникновение атомов кремния и углерода, формирующих плотную границу раздела;
3. **Центральная графитовая часть**, сохраняющая исходную слоистую структуру, которая придаёт материалу высокую теплопроводность и низкий коэффициент термического расширения.

Такая градиентная структура позволяет сочетать свойства керамики (твёрдость, жаростойкость, химическая стойкость) и графита (теплопроводность, самосмазывание), что делает силицированный графит уникальным конструкционным материалом для эксплуатации в экстремальных условиях.

Сравнение полученных данных с литературными источниками [1–4] показало, что механические свойства исследованных образцов соответствуют или превосходят характеристики аналогичных зарубежных материалов,

произведённых в Германии и Японии. Повышение предела прочности при сжатии до 300 МПа и твёрдости до 95 HRC связано с образованием карбидных фаз, укрепляющих структуру.

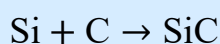
Кроме того, анализ термостойкости показал, что силицированный графит сохраняет до 90 % прочности при температурах до 1700 °С и демонстрирует устойчивость к окислению в течение длительного времени. Это подтверждает перспективность его применения в таких областях, как производство тиглей для плавления металлов, детали нагревательных установок, компоненты реактивных двигателей и химических насосов, работающих в агрессивных средах.

Таким образом, процесс силицирования не только улучшает физико-механические характеристики графита, но и формирует композиционный материал с синергетическим сочетанием свойств, ранее недостижимых для традиционных углеродных материалов.

Результаты

В результате проведённых экспериментов установлено, что процесс силицирования оказывает значительное влияние на физико-механические свойства и микроструктуру графита. После пропитки расплавленным кремнием наблюдалось образование новых фаз, обеспечивающих формирование плотной и термостойкой структуры.

Рентгенофазовый анализ (РФА) показал наличие трёх основных фаз: карбида кремния (SiC), свободного кремния (Si) и остаточного углерода (C). На дифрактограммах чётко проявляются пики при $2\theta = 35,6^\circ$, $41,4^\circ$ и $60,0^\circ$, соответствующие кристаллической решётке β -SiC, что подтверждает успешное протекание реакции:



Микроструктурный анализ показал, что после силицирования поверхность образцов покрыта плотным слоем карбида кремния толщиной 50–150 мкм, который постепенно переходит в переходную зону с включениями

свободного кремния. В центральной части образца сохраняется исходная графитовая структура.

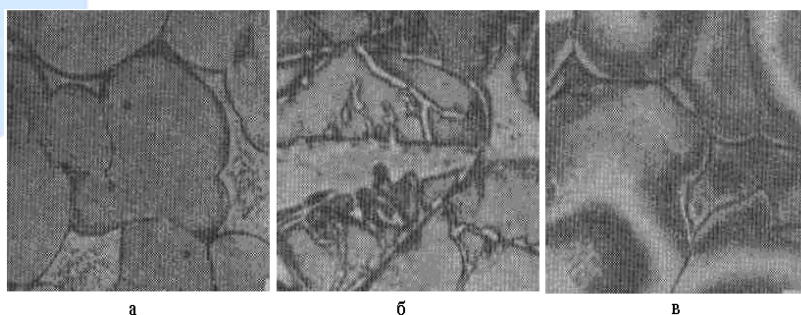


Рисунок 1. Микроструктура силицированного графитового материала:

а - фрагмент центра материала; б - поры, заполненные свободным кремнием; в - частицы свободного графита в материале

Физико-механические свойства полученных образцов приведены в таблице 1.

Физико-механические свойства силицированного графита

Показатель	Значение	Комментарий
Плотность, г/см ³	2,65	Повышение за счёт уменьшения пористости
Прочность при сжатии, МПа	300	В 2,5 раза выше, чем у исходного графита
Прочность при растяжении, МПа	455	Высокая деформационная стойкость
Модуль упругости, ГПа	3,0	Укрепление за счёт карбидных фаз
Твёрдость, HRC	75–95	Повышение из-за формирования SiC
Теплопроводность, Вт/(м·К)	110–130	Сохраняется высокая теплопроводность

Измерения плотности и пористости показали, что плотность силицированного графита увеличивается на 15–20 % по сравнению с исходным материалом, а открытая пористость снижается с 14 % до 4–5 %.

Термогравиметрический анализ (ТГА) подтвердил высокую термостойкость материала: заметная потеря массы начинается только при температуре выше 1700 °С.

Таким образом, результаты исследований подтверждают, что силицирование эффективно повышает механическую прочность, твёрдость, плотность и термостойкость графитовых материалов, обеспечивая им широкий потенциал применения в высокотемпературных и агрессивных средах.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что силицирование графита является эффективным методом модификации его структуры и свойств. Процесс пропитки спрессованных графитовых заготовок расплавленным кремнием при высоких температурах (1800–2000 °С) приводит к формированию в поверхностных слоях композиции из карбида кремния (SiC) и остаточного кремния, которые обеспечивают значительное повышение прочности, твёрдости и термической стабильности материала.

Полученные результаты свидетельствуют, что силицированный графит сочетает в себе лучшие свойства углеродных и керамических материалов:

- высокую прочность при сжатии (до 300 МПа);
- высокую твёрдость (до 95 HRC);
- устойчивость к окислению и износу;
- сохранение прочностных характеристик при температурах до 1700 °С;
- низкий коэффициент термического расширения и высокую теплопроводность.

Таким образом, силицированный графит можно рассматривать как перспективный конструкционный материал для применения в узлах и агрегатах, работающих при высоких температурах и в агрессивных средах — таких как тигли для плавления металлов, нагревательные элементы, защитные покрытия и детали реактивных двигателей.

Технология силицирования отличается относительной простотой и может быть успешно внедрена в промышленное производство. Это открывает возможности для создания новых углерод-керамических композитов, способных заменить дорогостоящие импортные материалы и обеспечить развитие высокотемпературных технологий в металлургии, энергетике и машиностроении.

Литература:

1. Тарабанов А.С., Костиков В.И. Силицированный графит. М.: Металлургия, 1977. 206 с.
2. Соседов В.П., Чалых Е.Ф. Графитация углеродных материалов. М: Металлургия, 1987. 174 с.
3. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин. — 3-е изд., стереотип. —М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. -648 с.: ил.
4. Гесингер Г.Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов: Пер. с англ. Челябинск: Металлургия. Челяб. отд., 1988. 320 с.
5. Тарабанов А. С., Костиков В. И. **Силицированный графит.** — Москва: Металлургия, 1977. — 232 с.
6. Соседов В. П., Чалых Е. Ф. **Графитация углеродных материалов.** — Москва: Металлургия, 1987. — 280 с.
7. Арзамасов Б. Н., Макарова В. И., Мухин Г. Г. **Материаловедение. Учебник для вузов.** — Москва: МГТУ им. Баумана, 2002. — 512 с.

8. Гесингер Г. Х. **Порошковая металлургия жаропрочных сплавов.** – Челябинск: Металлургия, 1988. – 364 с.
9. Савицкий Е. М. **Тугоплавкие металлы и сплавы.** – Москва: Наука, 1973. – 384 с.
10. Samsonov G. V., Ерік А. Р. **Тугоплавкие соединения.** – Киев: Наукова думка, 1976. – 420 с.