

2. Крапошин В. С. Термическая обработка стали и сплавов с применением лазерного луча и прочих прогрессивных видов нагрева. Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка. М.: ВИНТИ, 1987, Т.21, с.144-206.
3. Марков А. В., Проскуровский Д. И., Ротштейн В. П. Формирование зоны теплового влияния в железе и стали 45 при воздействии низкоэнергетичных сильнофокусированных электронных пучков. Томск: Изд. ТНЦ СО РАН, 1993, 63 с.
4. Новиков И. И. Дефекты кристаллического строения металлов: учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1983. – 232 с.
5. Hall E. O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results // Proc. Phys. Soc. B. - 1951. - V. 64. - P. 747-753.
6. Кикоин И. К. Справочник физических величин. М.: Металлургия, 1976. – 1008 с.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ SiC МЕТОДОМ ИСКРОПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

<sup>1</sup>М.К. СКАКОВ, <sup>2</sup>Н.М. МУХАМЕДОВА, <sup>1</sup>Ш.П. КУРБАНБЕКОВ, <sup>1</sup>Е.А. КОЖАХМЕТОВ

<sup>1</sup>Национальный ядерный центр Республики Казахстан

<sup>2</sup>Государственный университет имени Шакарима города Семей

E-mail: [bakayeva@nnc.kz](mailto:bakayeva@nnc.kz)

Проведено исследование материала на основе карбида кремния, полученного методом искроплазменного спекания порошков кремния и графита. Исходный состав исследуемых образцов составил 75 масс. % кремния и 25 масс. % графита (углеродистая основа). Выявлено, что твердость образцов составила от 1163 до 1226 по Виккерсу при нагрузке 800 г. Рентгено-фазовый анализ выявил, что материал имел трехфазную структуру. Методом сканирующей электронной микроскопии определено, что материал имел безпористую структуру.

*Ключевые слова:* порошковая металлургия, карбид кремния, керамика, искроплазменное спекание.

*Объект исследования:* материал, полученный на основе кремния и графита методом искроплазменного спекания.

*Цель работы:* исследование структурно-фазового состояния и механических свойств материала, полученного методом искроплазменного спекания (ИПС).

*Актуальность представленной работы:*

Материалы, на основе карбида кремния обладают уникальным набором физико-химических свойств, такие как низкая плотность, высокая твердость и прочность, химическая стойкость в окислительных средах и термостойкость. Благодаря таким свойствам, эти материалы широко применяются в машиностроении, химической, ядерной и нефтедобывающей промышленности.

В настоящее время применяются различные методы для получения карбида кремния и его модификаций, такие как пропитка углеродной основы расплавленным кремнием, спекание кремнезема с углеродом в графитовой электропечи Ачесона, получение материала «внутренним силицированием» и др. [1-2]. Особое развитие в последнее десятилетие по получению материалов на основе карбида кремния с помощью порошковой металлургии является метод искроплазменного спекания (SPS – Spark Plasma Sintering).

Данный метод позволяет эффективно контролировать пористость спекаемых материалов и получать компактные образцы соединений, обычное прессование которых практически неосуществимо. При проведении процесса SPS не требуется проводить предварительную обработку материала давлением и нет необходимости в использовании специальных связующих компонентов. Изготовление деталей происходит сразу в

окончательной форме. Исходная микроструктура порошков при этом сохраняется. Кроме того, с применением анализируемого метода возможно получение материалов совершенно нового типа, имеющих высокую термическую устойчивость [3-4].

Объектом исследования был выбран материал полученный на основе кремния и углерода. В качестве исходных сырьевых материалов для получения силицированного графита использовались порошки Si (99,9 %), C (99,1 %) / Соотношение порошков в формируемой композиции составляло Si -75 масс.%, C-25 масс.%.

Смешивание порошков проводили в вибрационной микромельнице PULVERISETTE 0 (фирмы FRITSCH).

Спекание порошковых смесей проводили на специальной установке Labox-1575. Механические испытания на твердость проводили на приборе Qness с нагрузкой на индикатор 800 г. Плотность образцов была рассчитана методом гидростатического взвешивания. Результаты представлены в таблице 1.

В исследуемых образцах обнаружены фазы карбидов кремния с кубической и гексагональной кристаллической решеткой. Затруднительно точно произвести выбор между политипами карбида кремния ввиду совпадения положений и относительных интенсивностей основных линий.

Таблица 1 – Свойства образцов

№	Температура спекания, [°C]	Время выдержки, [мин]	m, [г]	$\rho, \text{г/см}^3$	Твердость, [HV 0,8]
1	Прототип	-	4,66	2,8	1800
2	1200	5	3,75	2,4	1181
3	1300	5	3,85	2,5	1560

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре Empyrean с управляющей компьютерной системой RenGen-Master с использованием  $\text{CuK } \alpha$ -излучения. Дифрактограммы полученных исследований указаны на рисунке 1.

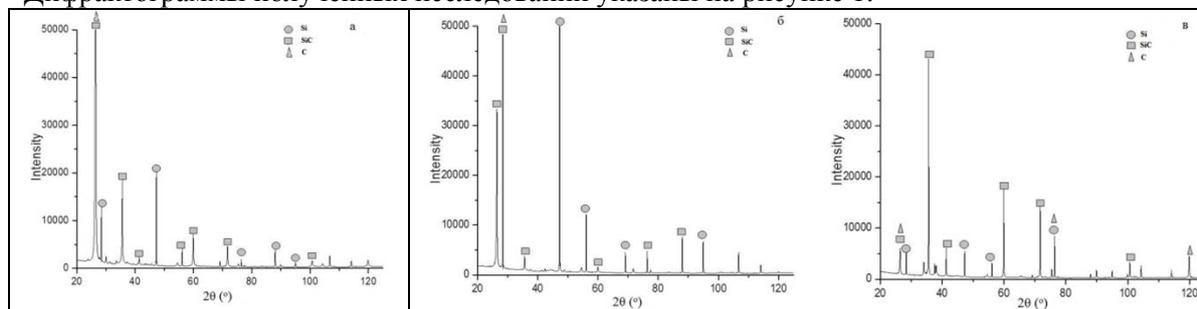


Рисунок 1 - Дифрактограммы, полученных образцов Si -75 масс.% и C – 25 масс.% после спекания при температурах 1300 °C (а), 1200 °C (б), прототип материала (в)

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

- плотность образцов, полученных методом искроплазменного спекания, для температуры 1200°C составляет 2,4 г/см<sup>3</sup>, а для 1300°C 2,5 г/см<sup>3</sup>;
- методом рентгенофазового анализа, выявлено, что в структуре исследуемого образца три фазы: карбид кремния, кремний и углерод. Карбид кремния (SiC) имеет два типа кристаллической решетки: кубическую и гексагональную, а также в структуре материала также присутствует свободный кремний и углерод;
- установлена твердость полученного образца, которая при нагрузке HV 0,8 составляет от 1000 до 1800 HV.

Опираясь на полученные результаты можно сказать, что порошки, полученные из промышленного лома, могут быть использованы в качестве исходных составляющих для

получения необходимого материала. Метод искроплазменного спекания также является оптимальным для получения материала со свойствами, не уступающими прототипу.

#### Список литературы

1. Bhaumik S. K. Synthesis and sintering of SiC under high pressure and high temperature / Bhaumik S. K., Divakar C., Usha Devi S. // J. Mater. Res. Soc.. - v. 14. - № 3. - P. 901–906.
2. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания: учеб.-метод. пособие / Нижегородский государственный университет. – Нижний Новгород, 2012. – 59 с.
3. С.Н. Перевислов, Д.Д. Несмелов, М.В. Томкович Получение материалов на основе SiC и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> методом высокоимпульсного плазменного спекания / Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского, 2013, № 2 (2), с. 107-114.
4. С.Н. Перевислов, Д.Д. Несмелов, М.В. Томкович Получение материалов на основе SiC и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> методом высокоимпульсного плазменного спекания / Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского, 2013, № 2 (2), с. 107-114.

### СТРУКТУРА ОБРАЗЦОВ Тi-Nb СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ СЛС-МЕТОДОМ

*В.А. РУБАНОВ<sup>1</sup>, М.Г. КРИНИЦИН<sup>1,2</sup>, М.А. ХИМИЧ<sup>2,3</sup>*

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Ж.Г. Ковалевская<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,

E-mail: [rubanov1994@mail.ru](mailto:rubanov1994@mail.ru)

В последние несколько лет во всем мире наблюдается быстрое развитие аддитивных технологий [1]. Под этими терминами подразумевается изготовление детали путем послойного добавления материала. На сегодняшний день такие технологии различаются друг от друга, как выбором материалов, так и способом их послойного нанесения. Одним из наиболее актуальных методов создания трехмерных изделий является метод селективного лазерного сплавления (СЛС) [2]. Эта технология позволяет создавать из металлических порошков и их композиций объемные изделия с пористостью 0-3 %, что сравнимо с металлическими изделиями, получаемыми традиционными методами.

В центре «Современные производственные технологии» ИФВТ НИ ТПУ разработана экспериментальная установка «Луч», предназначенная для селективного лазерного сплавления металлических порошков. Основные характеристики установки «Луч»: волоконный непрерывный лазер ЛК-5000М мощностью 500 Вт; сканаторная головка LscanH-14-1064 с программным обеспечением LDesigner, размером пятна в фокусе лазерного излучения 205 мкм и фокусным расстоянием 330 мм.

Целью проведенной работы было продолжение исследования образцов из сплава Ti-Nb, полученных на установке «Луч» с варьированием параметров процесса сплавления.

В качестве исходного материала в работе использовался порошок сплава Ti-45Nb, полученный механоактивацией в шаровой мельнице АГО-2С [3]. Образцы получали в герметично закрытой камере при давлении аргона ~1,6 атм. Частицы порошка имели форму окатышей со средним размером 20 мкм. Каждый слой образцов получали в два прохода лазером с одинаковой разверткой, но разной скоростью. Развертка представляла собой параллельные друг другу линии с шагом между ними 200 мкм. Каждый последующий слой развертка поворачивалась на угол 90° для обеспечения высокой плотности получаемого образца. Основными изменяемыми параметрами были мощность излучения, скорость сканирования и толщина слоя (таблица 1).