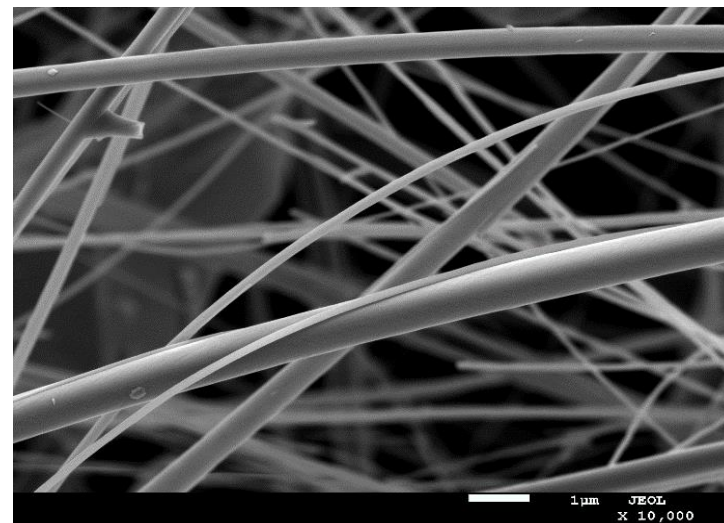
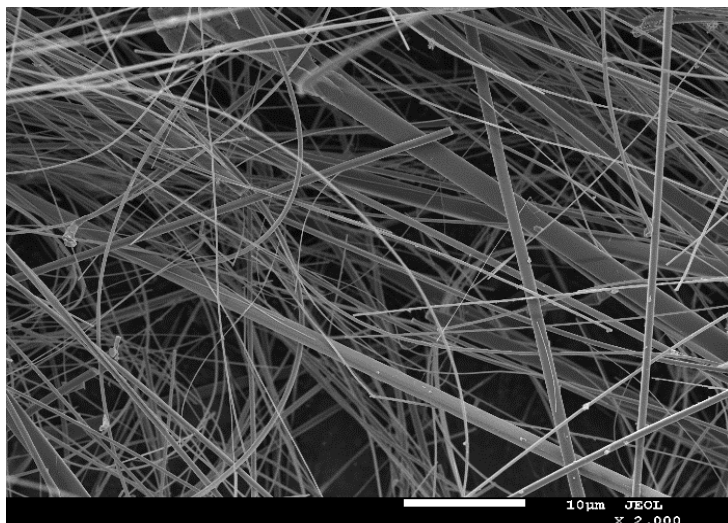


Исследование структуры и механических свойств
композиционного материала типа SiC/SiC,
армированного нитевидными кристаллами SiC, для
перспективного применения для оболочек ТВЭЛ

Юрков М.А., Горбачева М.В., Агафонов С.В., Хорев В.А., Румянцев В.И.,
Карпюк Л.А., Глебов А.В.

Нитевидные кристаллы карбида кремния

Параметр, ед. изм.	Нитевидные кристаллы ТУ 6-02-1183-79	Непрерывное волокно Hi-Nicalon-Type S
Диаметр, мкм	0,2-1,0	12
Средняя длина, мкм	200-1500	непрерывное
Плотность, г/см ³	3,2	3,1
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	4000	2600
Модуль упругости, МПа, не менее	3×10^5	4×10^5
Содержание О, %	< 2,6	0,2
Примеси, %	< 5	-



Нитевидные кристаллы SiC – Технология производства заготовок

Диспергация нитевидных кристаллов



Подготовка сырья для формования – введение связующего и/или предкерамического полимера



Формование

Прессование

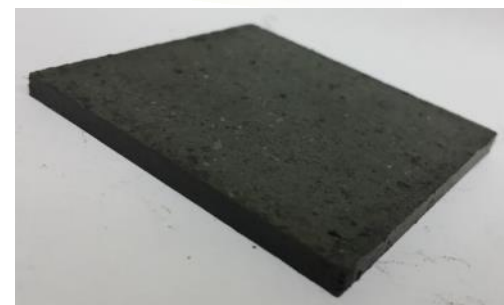
Литье

Аддитивная
технология

Бумажная
технология



Термообработка

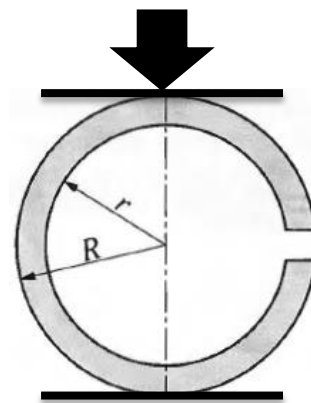


Методы испытаний

Предела прочности при изгибе

ISO 18558:2015 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for determining elastic modulus and bending strength of ceramic tube and rings

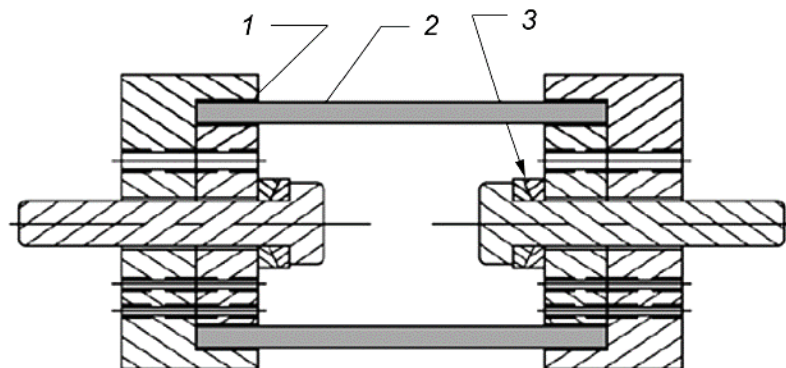
Разрывная машина Shimadzu AGX-100кН



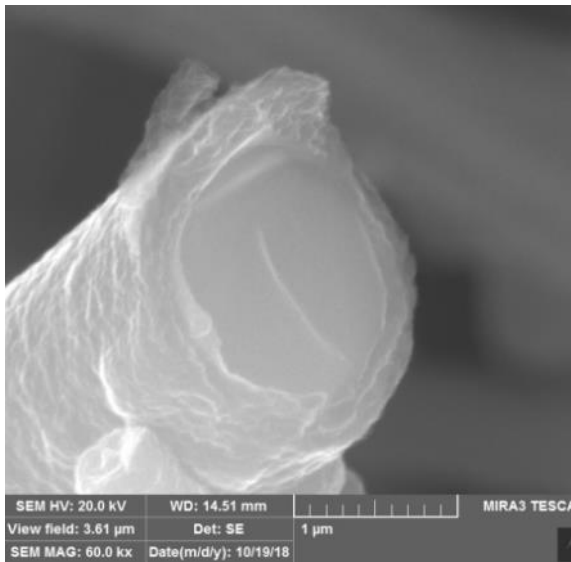
Предела прочности при растяжении

ГОСТ Р 57857-2017 «Композиты керамические. Определение прочности при осевом растяжении и отклика напряжение-деформация при монотонном нагружении на цилиндрических образцах при нормальной температуре»

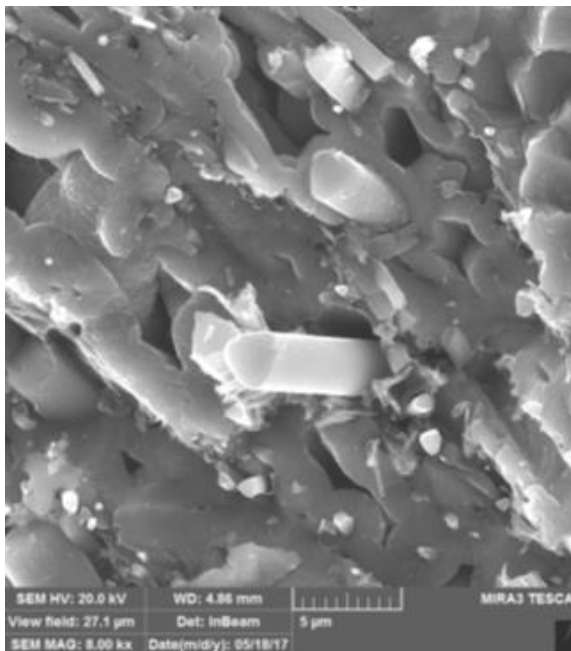
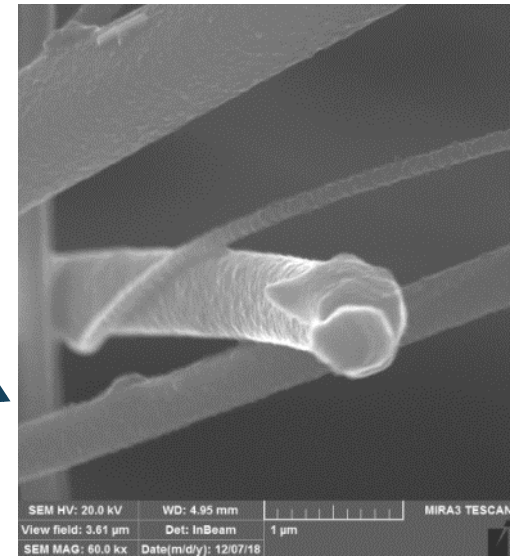
Универсальная разрывная машина Р-50



Создание керамоматричных композитов на базе НК SiC. Анализ структуры



РЭМ снимки микроструктуры
нитевидных кристаллов SiC с
RuC покрытием



КМ SiC/SiC
Плотность 2,94 г/см³
Пористость 8 %



РЭМ снимок микроструктуры композита с нитевидными кристаллами SiC с покрытием RuC, присутствует эффект вытягивания волокон

Микроструктура слоя SiC/SiC обеспечивающего прочностные свойства конструкции

Результаты работ с корпорацией Росатом

Изготовлены образцы из КМ НК SiC/SiC трубчатой и кольцевой формы - проведены испытания

	Вириал	Лит. данные	Лит. данные
Каркас	Нитевидные кристаллы SiC		Непрерывное волокно SiC
б растяж, МПа	До 180	158	230-270
б изгиба, МПа	До 250	315	350-450
КЛТР, 1/К	$2,35 \cdot 10^{-6}$	-	-



Высокотемпературное испытание

	T, °C	КМ НК SiC/SiC
б изгиба, МПа SiC/SiC с короткими волокнами	20	286
	500	305
	1200	391



Выводы

1. Создан композиционный керамоматричный материал типа SiC/SiC, армированный нитевидными кристаллами карбида кремния (НК SiC), которые покрыты интерфазой из пиролитического углерода (PyC), с матрицей из карбида кремния (SiC), сформированной методом CVI из прекурсора метилтрихлорсилан (CH_3SiCl_3).
2. Анализ микроструктуры поверхности разрушения образцов показал наличие вытягивания НК SiC из матрицы, что говорит об эффективной работе армирующего каркаса.
3. Уровень физико-механических характеристик находится на уровне последних разработок по дисперсноармированным кристаллами SiC композитам типа SiC/SiC и приближается к уровню свойств SiC/SiC композитов, армированных непрерывным волокном.
4. Достигнутый уровень свойств полученного композита SiC/SiC позволяет рассматривать материал как перспективный для применения в деталях ТВС ЯР.
5. Необходимо продолжить изучение теплофизических и высокотемпературных свойств созданного материала.
6. Дальнейшее повышение $\sigma_{\text{раст}}$ и $\sigma_{\text{изг}}$ планируется проводить за счет:
 - ✓ увеличения объемного содержания армирующей компоненты;
 - ✓ реализации подходов по упорядочиванию армирующего каркаса из НК SiC в направлении максимальных растягивающих напряжений;
 - ✓ реализации подходов по созданию комбинированных каркасов на основе непрерывного волокна и нитевидных кристаллов SiC.