



Студентка 3 курса бакалавриата Чернавская Екатерина Романовна

И. В. Федотов, А. Н. Сучков, А. А. Иванников, П. С. Джумаев, О. Н. Севрюков  
НИАУ МИФИ Кафедра физических проблем материаловедения №9

# Получение паяных соединений карбида кремния SiC/SiC с помощью металлических припоев

ekat\_rom\_form@mail.ru

Москва 2022.



# Актуальность и цель исследования

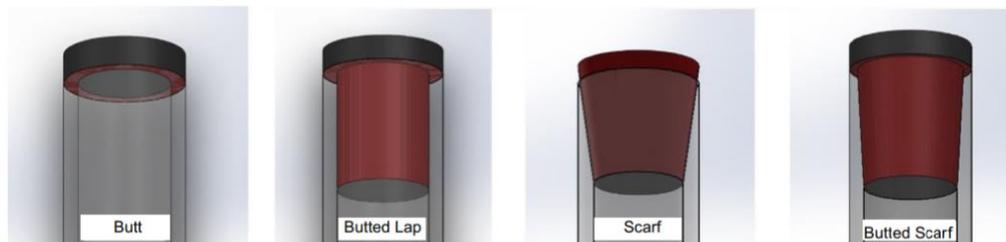
## Аварии с потерей теплоносителя (LOCA)



Авария на Фукусима-дайти в 2011 году .

### Требования к материалам:

1. Механическая устойчивость и прочность
2. Слабое поглощение нейтронов
3. Отсутствие взаимодействия с ядерным топливом, продуктами деления , теплоносителем и замедлителем
4. Радиационная стойкость
5. Термостойкость ( способность выдерживать 1200 °С)



Schematic representation of cylindrical joint geometries evaluated in this work.

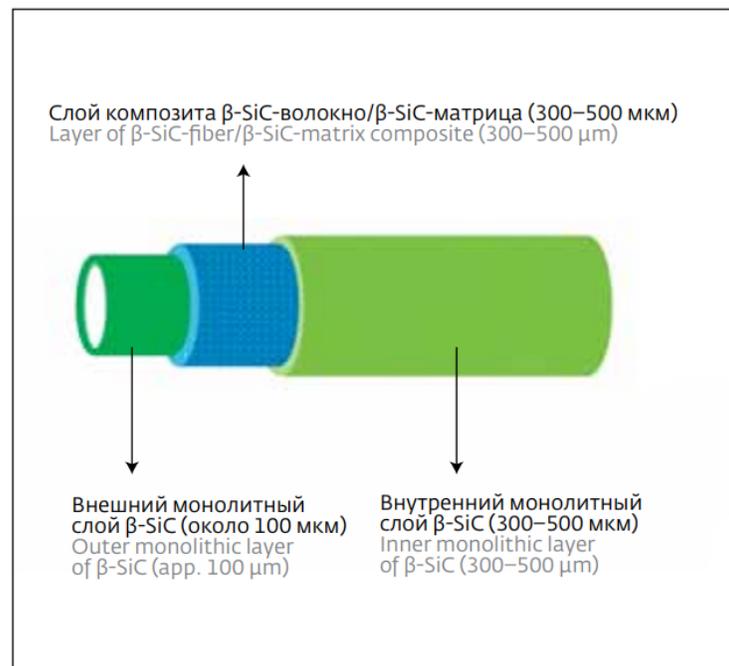


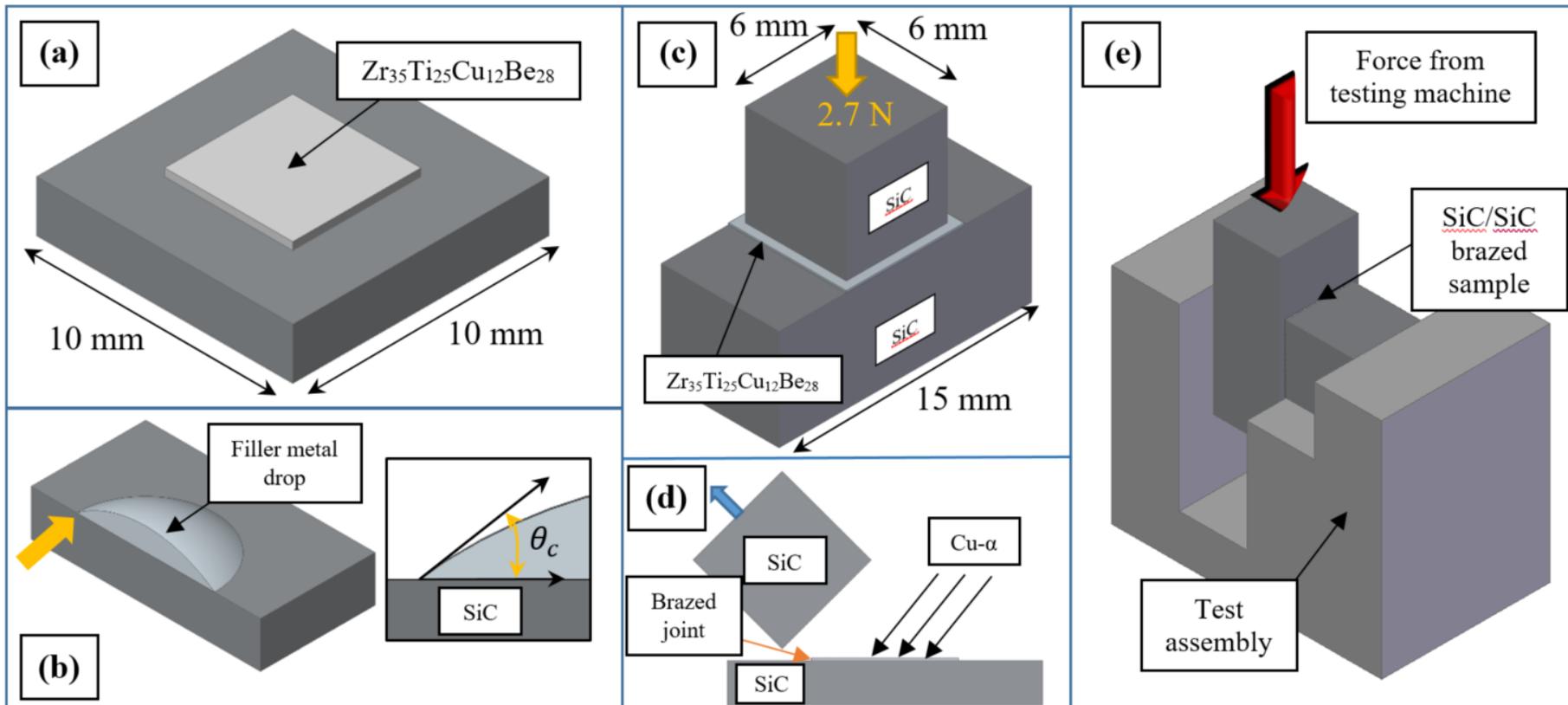
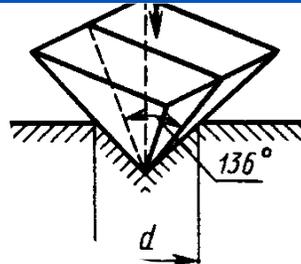
Рис.3. Схема трехслойной трубчатой SiC/SiC-оболочки

Целью данной работы был анализ применения припоя  $\text{Zr}_{35}\text{Ti}_{25}\text{Cu}_{12}\text{Be}_{28}$  для пайки карбида кремния SiC / SiC. Изучение структурно-фазового состояния паяных соединений, исследования их механических характеристик и проведение испытаний на термостойкость .



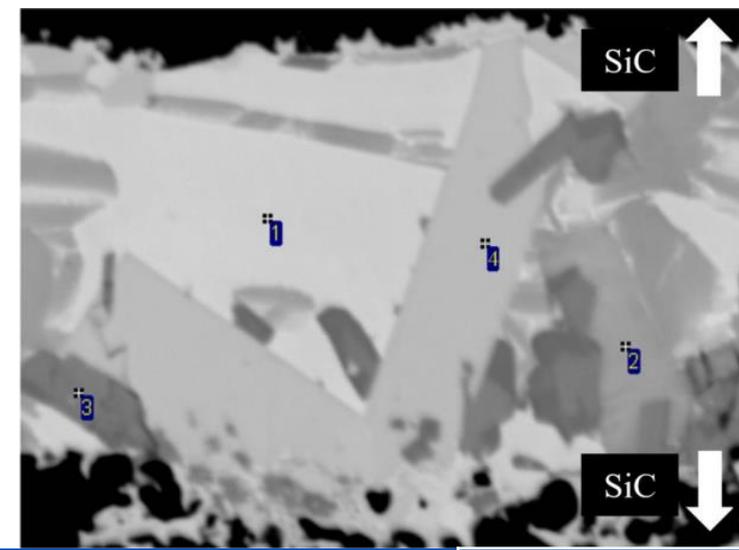
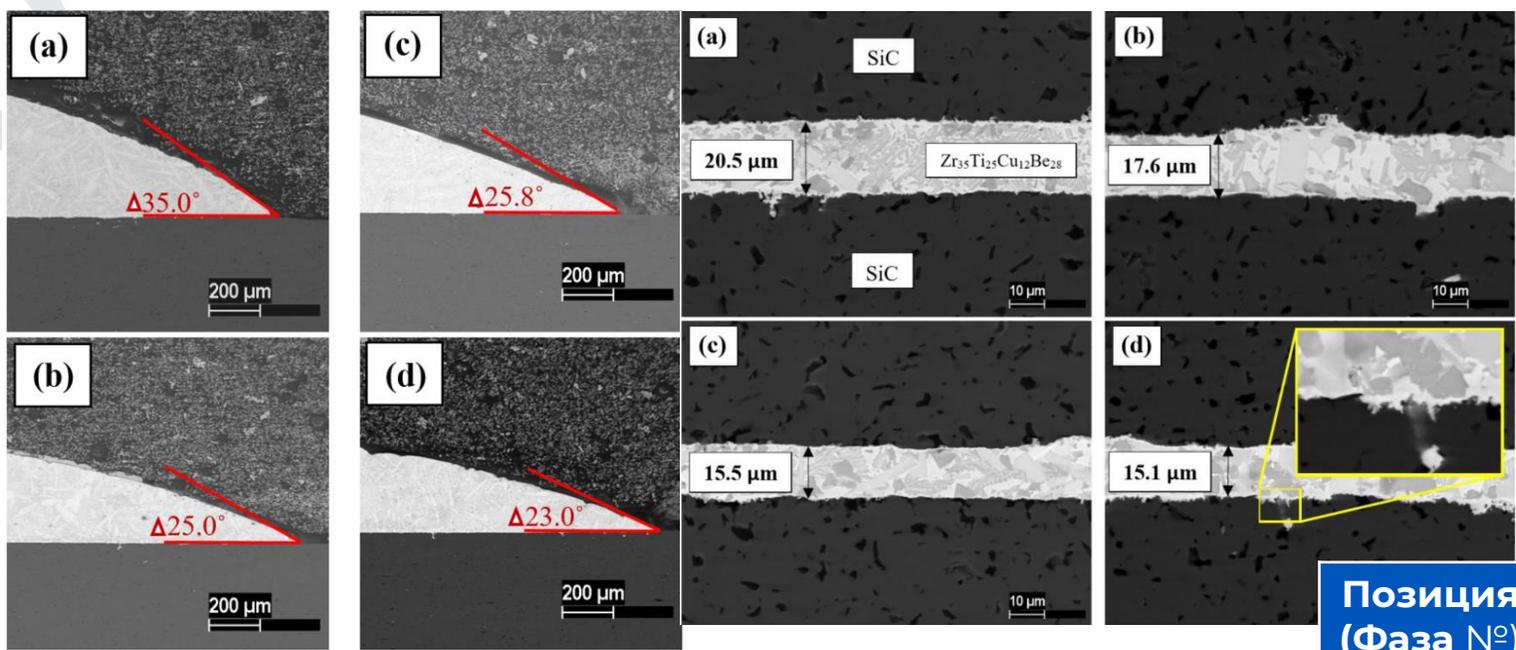
# Методы подготовки исследуемых образцов

Схематические изображения методов подготовки и исследования: (a) - карбид кремния с припоем  $Zr_{35}Ti_{25}Cu_{12}Be_{28}$ ; (b) измерение краевого угла смачивания капли  $Zr_{35}Ti_{25}Cu_{12}Be_{28}$  на SiC; (c) пайка образцов SiC/SiC; (d) выполнение рентгеновского исследования; (e) испытания на механический срез соединений SiC / SiC.



1. Режим пайки: 720-810° C, выдержка 10 минут.
2. Сканирующая электронная микроскопия (получение микроструктуры)
3. Микрорентген-спектральный анализ
4. Дифракция отражённых электронов (идентификации кристаллической решетки фаз и определения фаз, образующихся в паяном шве)
5. Расшифровка рентгеновских спектров для фазового анализа
6. Измерение микротвердости Виккерса

# Исследование смачивания карбидом кремния и микроструктуры соединений



Угол смачивания капли присадочного металла  $Zr_{35}Ti_{25}Cu_{12}Be_{28}$  на SiC после нагрева до 720 °C (а); (б) 750 °C; (с) 780 °C; (д) 810 °C при времени выдержки 10 мин.

Микроструктура соединений SiC / SiC, спаянных при 720 °C (а); (б) 750 °C; (с) 780 °C; (д) 810 °C при времени выдержки 10 мин при температуре пайки.

Позиция (Фаза №)	Элементный состав, ат. 10%					Возможные фазы
	C	Si	Ti	Cu	Zr	
1	-	-	16.4	33.9	49.7	$(Zr, Ti)_2Cu$
2	-	1.2	15.1	1.5	82.2	$ZrBe_2$
3	2.9	0.4	68.5	14.5	13.7	$ZrBe_2, TiBe_2$
4	2.7	14.4	2.8	7.9	72.2	$Zr_3Si$

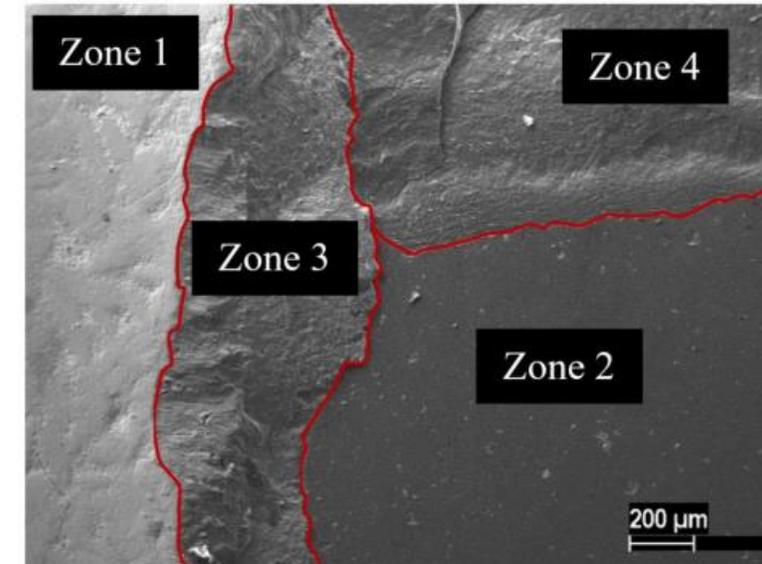
# Механические свойства паяных соединений из карбида кремния и термостойкость



Факторографический анализ карбидокремниевое соединения после испытаний на срез

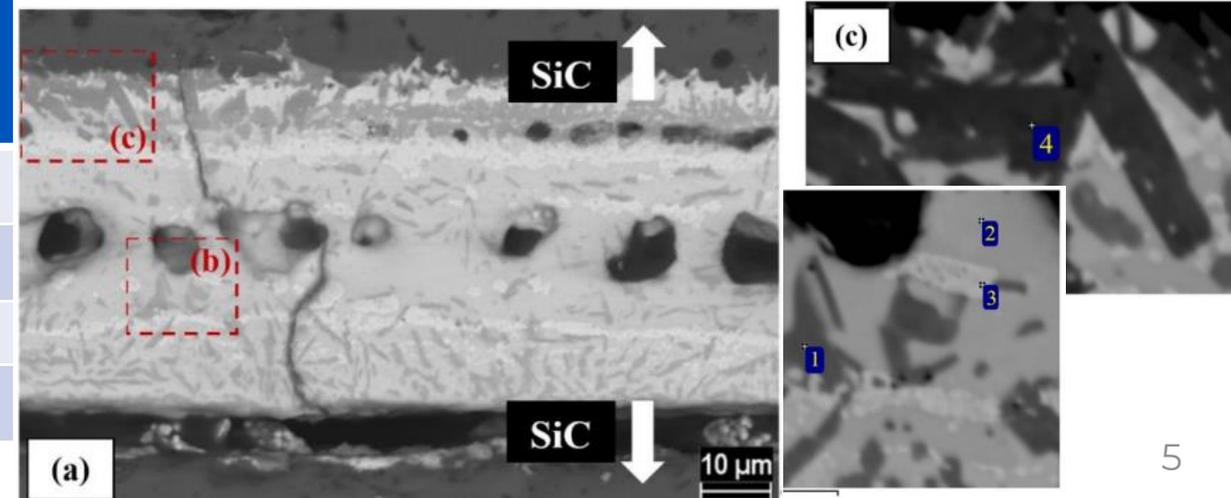
Механические свойства паянного соединения SiC/SiC

Температура пайки, °C	720	750	780	810
Толщина паяного соединения	20.5	17.6	15.5	15.1
Микротвердость по Виккерсу, ГПа	3.8±0.6	3.7±0.5	3.9±0.4	3.6±0.4
Средняя прочность на срез, МПа	153±54	164±50	-	201±57



Паяное соединение SiC / SiC после нагрева до 1450 °C и выдержки 10 мин.

Позиция (фаза) №	Элементный состав, ат. %					Возможная фаза
	C	Si	Ti	Cu	Zr	
1	33.3	16.1	43.4	-	7.2	TiC
2	-	49.8	2.8	4.9	42.5	ZrSi
3	49.3	2.3	4.4	0.4	43.6	ZrC
4	48.7	5.9	39.7	-	5.7	TiC



По результатам использования аморфного припоя  $Zr_{35}Ti_{25}Cu_{12}Be_{28}$  для пайки SiC получены следующие результаты:

1. Угол смачивания припоя  $Zr_{35}Ti_{25}Cu_{12}Be_{28}$  на карбидокремниевой керамике уменьшался от 35 до 23° при увеличении температуры пайки от 720 °С до 810 °С. **Паяный шов SiC/SiC** содержит четыре фазы: интерметаллид  $(Zr,Ti)_2Cu$ , бериллиды  $ZrBe_2$ ,  $TiBe_2$  (хрупкие твёрдые фазы) и, возможно, силицид  $Zr_3Si$ . В паяном соединении не обнаружен реакционный слой.

2. Разрушение паяных соединения SiC/SiC происходит по хрупкому механизму, преимущественно, через границу SiC/ $(Zr,Ti)_2Cu$ . Прочность на срез увеличивалась от **153 до 201 МПа** при увеличении температуры пайки от 720 °С до 810 °С. Этот результат является наилучшим на данный момент по пайке карбида кремния. Значения микротвёрдости изменяются в диапазоне **3,6–3,9** ГПа и почти не зависят от режима пайки.

3. Соединение **выдерживает** нагрев до 1450 °С при растягивающей нагрузке 0,353 Н без разрушения, при этом происходит изменением его микроструктуры и фазового состав. Это проявляется в растворении карбида кремния и в увеличении толщины паяного шва. Структура шва после высокотемпературного воздействия состоит из матрицы на основе SiC с выделениями карбидов TiC и ZrC. Паяное соединение после нагрева содержит большие трещины.