



Разработка и испытания многослойных композиций современных материалов для термоядерных реакторов

Ю.М Гаспарян

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

27.10.2022



Благодарность за помощь в подготовке презентации:

НИЯУ МИФИ:

А.А. Писарев, Г.М. Тарасюк, С.А. Крат, И.А. Сорокин, Е.Д. Маренков
Р.А. Селиванов, О.Н. Севрюков, Д.М. Бачурина, А.Н. Сучков

LiWFusion:

Л.Е. Захаров

АО «Красная Звезда»:

А.В. Вертков, М.Ю. Жарков

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова:

П.Ю. Пискарев, И.В. Мазуль, О.Ю. Огурский, Р.В. Рулев

Содержание

- ❖ Проблемы выбора обращенных к плазме элементов ТЯУ
- ❖ Альтернативные концепции ОПЭ
- ❖ Разработки на основе жидкого лития
- ❖ Разработка припоев для многослойных композиций

Обращенные к плазме материалы

❖ Выбор материалов и конструкция обращенных к плазме элементов (ОПЭ) в термоядерных установках должны обеспечивать:

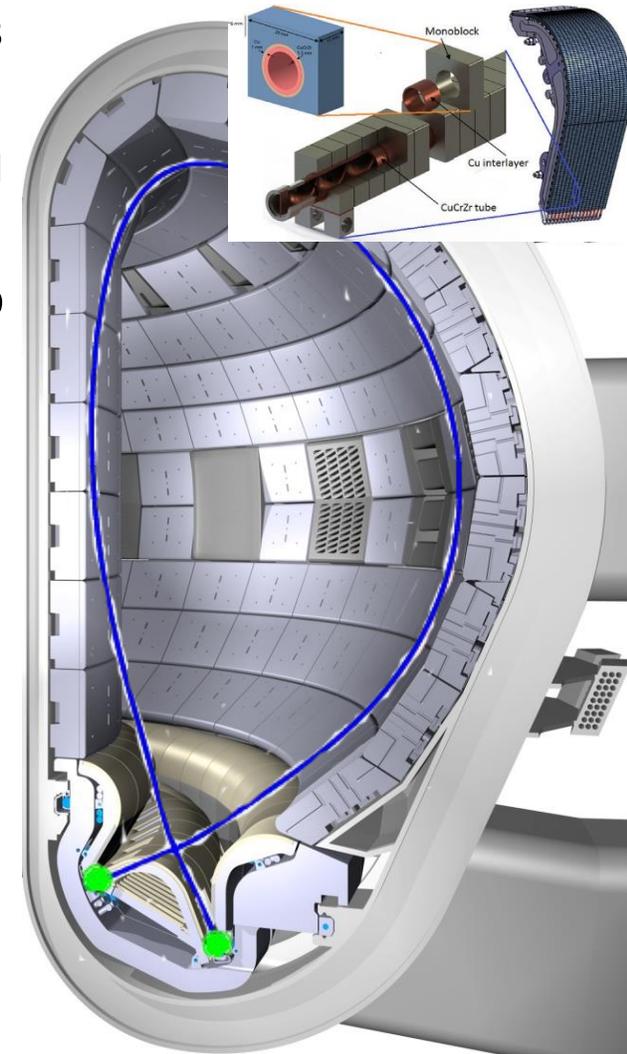
- Устойчивость ОПЭ к мощным тепловым потокам (стационарным и импульсным)
- Большой ресурс (с учетом распыления, коррозии, нейтронного воздействия)
- Приемлемое загрязнение плазмы и накопление тития в стенках

❖ Требуется использование многослойных композиций

❖ На сегодняшний день определены ОПЭ для ИТЭР, но активно разрабатываются новые решения для будущих реакторов.

Направления работ:

- Разработки материалов с улучшенными свойствами
- Концепции «возобновляемой стенки»
- Новые сценарии плазменных разрядов, новая геометрия магнитной системы и т.д.

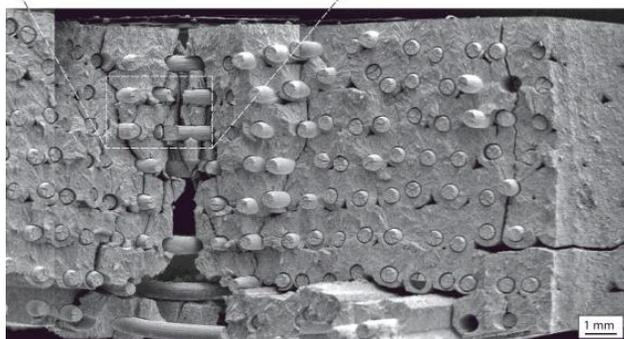


Материалы с улучшенными свойствами

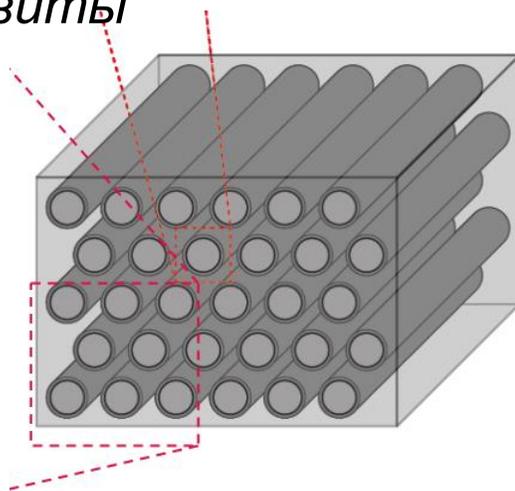
В Европе и ряде других стран следующий после ITER демонстрационный реактор планируется строить со стенкой, полностью покрытой вольфрамом.

Поэтому активно исследуются **новые сплавы и композитный материалы на основе вольфрама, чтобы устранить его недостатки.**

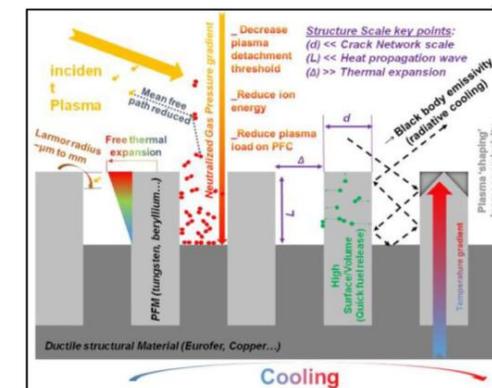
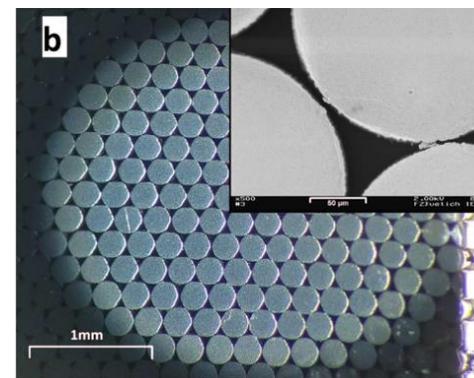
W/W композиты



J. Riesch et al. NME (2016)



Микроструктурированный W



A. Terra et al. NME (2020)
A. Terra et al. Phys. Scr. (2020)

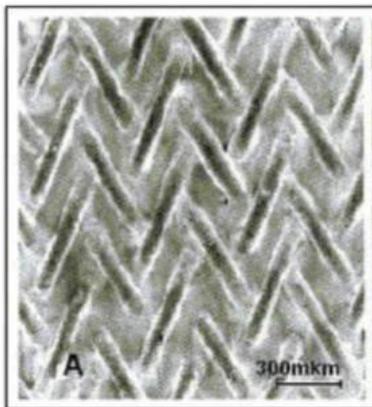
«Возобновляемая» стенка

Более инновационный подход к защите стенки - это реализация подхода «**возобновляемой поверхности**»!

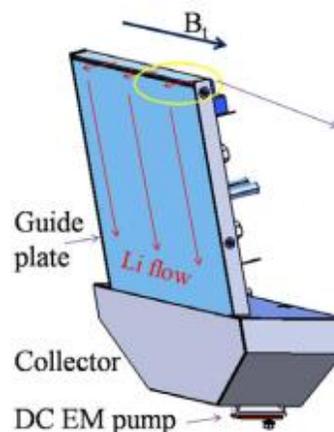
➤ **Использование жидких металлов**

Жидкая поверхность легко возобновляется даже после огромных тепловых потоков!

КПС (Капиллярно-пористые системы)



Текущий поток лития по пластине



➤ **Возобновляемые покрытия**

Нанесение покрытий (например, W_4C или W) на поверхность ОПЭ внутри установки

Влияние лития на плазму и тепловые потоки на стенку

- Литий имеет низкий атомный номер, возможны большие концентрации в плазме.
 - Литий резко снижает количество примесей в плазме, т.к. является хорошим геттером.
 - Литий заполняет SOL и плохо идет в центр шнура (Расхождение с расчетами?) Возможно равномерное перераспределение потоков тепла на стенку?
 - Подавление ELMов
 - При максимальных нагрузках облако из испаренного лития экранирует потоки на стенку!
- + Возможны принципиально новые режимы стабильного горения разряда?



DIII-D, San Diego

Режим с низким рециклингом

Согласно предсказаниям **Л.Е. Захарова** при обеспечении **низкого рециклинга** (малого потока водорода со стенок по отношению к падающему) можно ожидать:

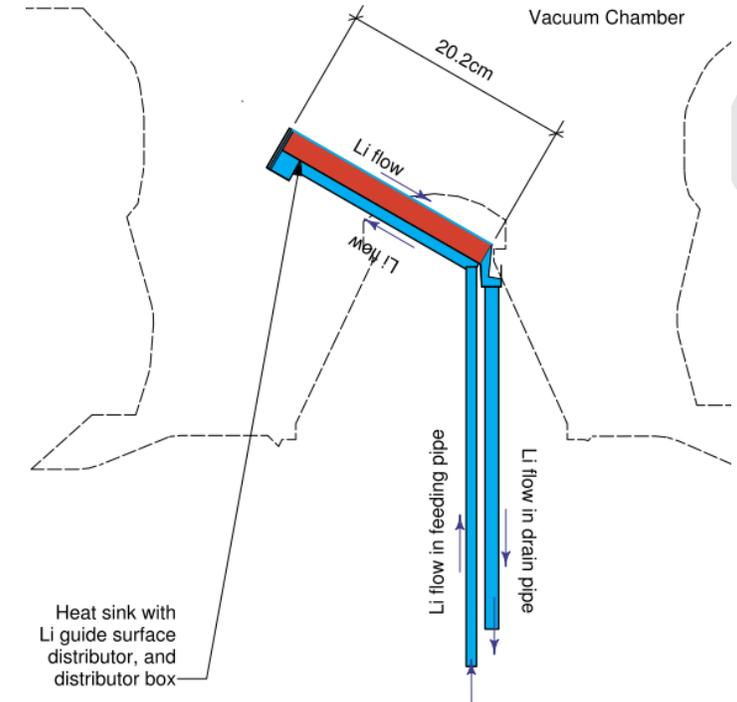
- Высокую температуру плазмы по всему объему и более эффективное использование объема плазмы для генерация энергии.
- Подавление турбулентных потоков в плазме и, как следствие, мощных импульсных нагрузок на стенку.

Для реализации низкого рециклинга предлагается размещение в диверторной области **пластины с текущим** (со скоростью порядка см/с) **жидким литием**.

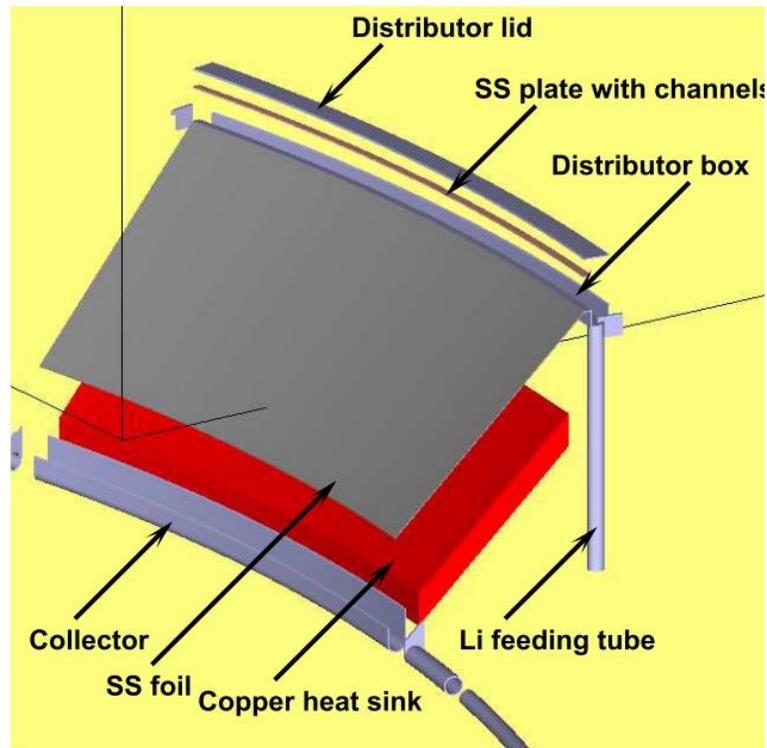
Циркуляция лития обеспечивается литиевой петлей, снабженной электромагнитными насосами за пределами токамака



- Л.Е. Захаров. Атомная энергия, 2021, т.130, в.2, с.89
- L.E. Zakharov. Nucl. Fusion, 59 (2019) 096008.



Опыт реализации «пластины с текущим литием»



Концепция «текущего лития» впервые тестировалась на китайском токамаке EAST.

Нерешенная проблема: плохое качество основного элемента – биметаллической пластины (Сталь + медь), поддерживающей слой текущего слоя жидкого лития.

Пластина должна состоять из тонкого слоя коррозионностойкой стали и толстого слоя меди. Критическим фактором являлось наличие локальных несплошностей соединения по границе раздела металлов, что приводило к недопустимым локальным перегревам.

Опыт реализации «пластины с текущим литием»

В рамках совместных работ НИЯУ МИФИ, НИИИЭФА, АО Красная звезда, ИФХ РАН было испытано несколько технологий соединения пластины, которые позволили получить надежное соединение.

Лучшие результаты показала технология - **горячее изостатическое прессование (НИИЭФА).**

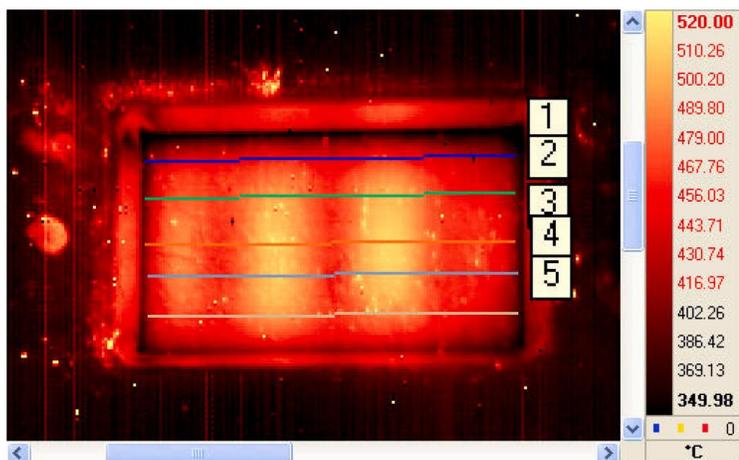


Изготовлена биметаллическая пластина со слоем стали (0,2 мм) с водяным охлаждением.

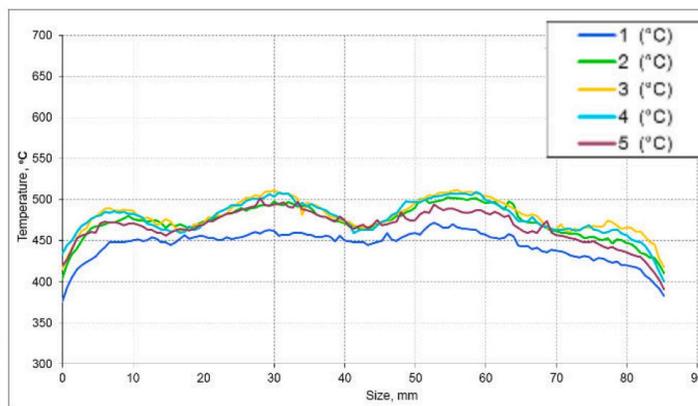
Проведены успешные тепловые испытания и литиевые испытания.

Тепловые испытания (с водяным охлаждением)

Хорошая однородность температуры $\Delta T(K)/T(K) < 7\%$ и стабильность в течение 1000 циклов при 8 МВт/м^2

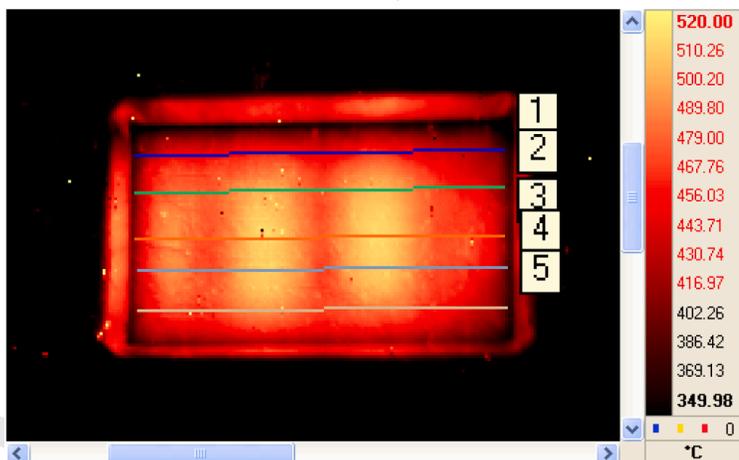


a)

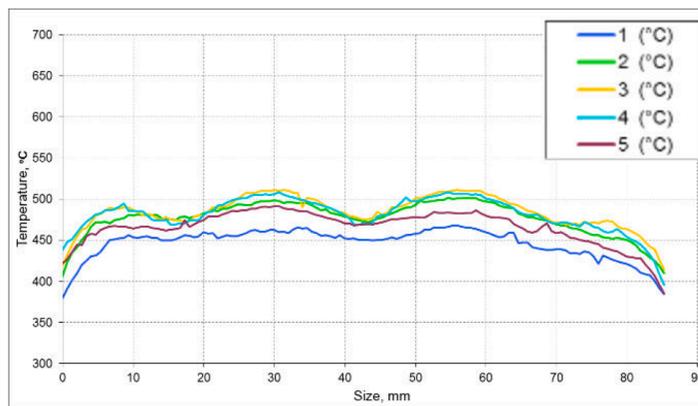


b)

Поглощенная энергия:
 $8,4 \text{ МВт/м}^2$ (первое
испытание)



a)



b)

Поглощенная энергия:
 $8,26 \text{ МВт/м}^2$ (после 1000
циклов)

Литиевые испытания

0,2 г/с



0,8 г/с



- Поверхность полностью смачивается перед началом течения лития и остается смоченной в ходе эксперимента
- Хорошая смачиваемость достигается при 450 °С
- При потоке 0,2 г/с поток лития покрывает 30% поверхности
- При потоке 0,8 г/с поток лития покрывает 80% поверхности

В будущих работах будут исследоваться методы улучшения смачиваемости поверхности.

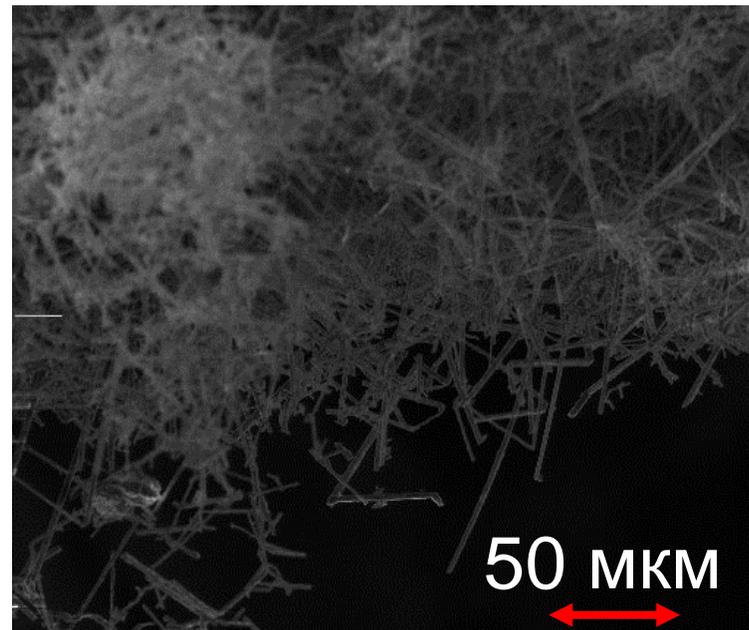
Разработка макета литиевой пластины (планы)

- Демонстрация возможности изготовления пластин большей площади, обладающих равномерным теплоотводом по поверхности и термоциклической стабильностью.
- Демонстрация работоспособности технологий, обеспечивающих циркуляцию лития через литиевую пластину
- Разработка методов увеличения смачиваемости пластины и равномерного течения лития по всей поверхности пластины
- Демонстрация возможности увеличения смачиваемости пластины перед ее установкой в вакуумную камеру и после ее установки в вакуумную камеру

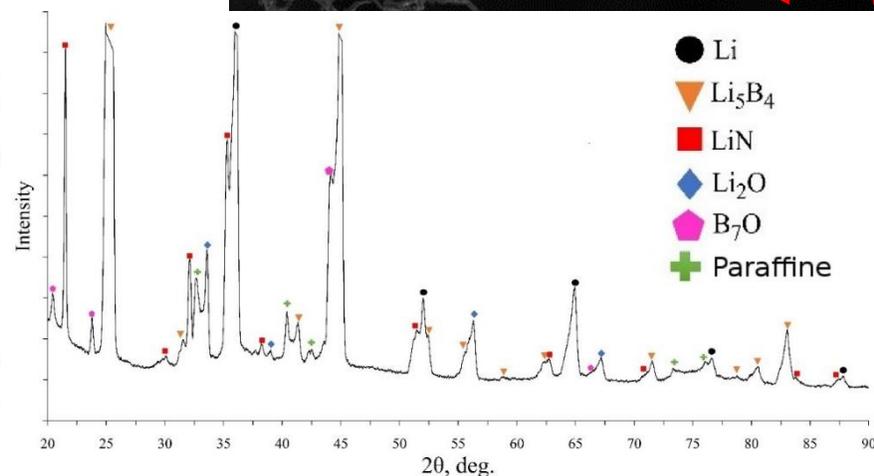
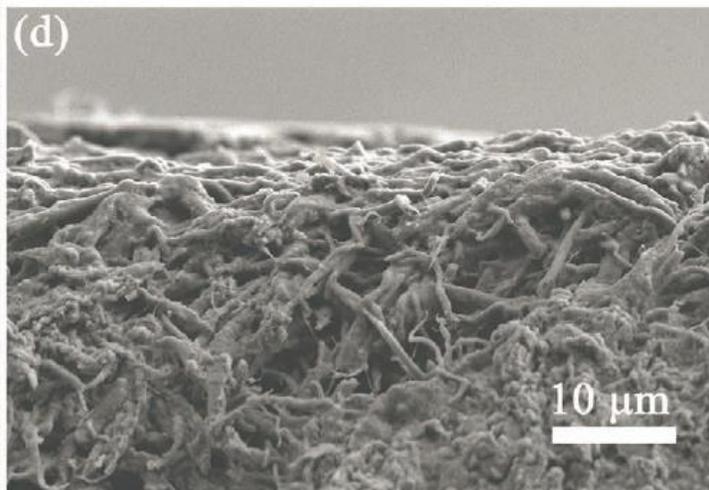
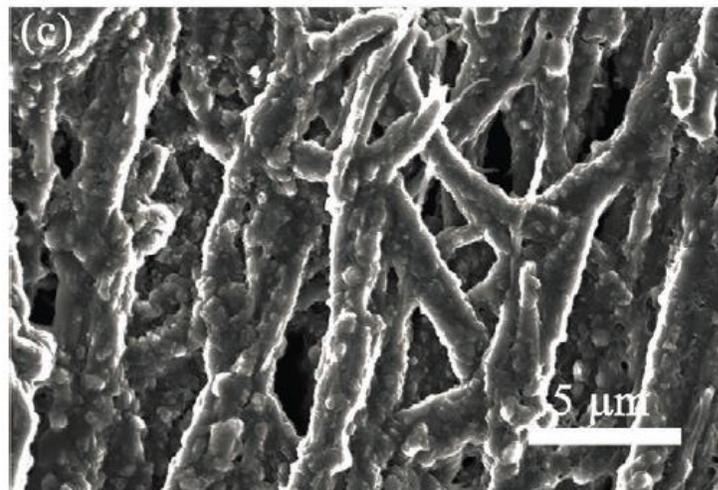
Бор-литиевый композитный материал (БЛКМ)

- Отливается из порошка бора и лития. Возможна любая форма деталей. Механически близок к литию
- Состоит из матрицы борида лития (Li_5B_4 или Li_7B_6) заполненной металлическим литием – аналог КПС (поры ~ 1-5 мкм)
- Температура плавления Li_5B_4 ~ 1100 °С
- Производится в ИВТЭ УРО РАН (Екатеринбург) и в Китае.

Российский БЛКМ



Микроструктура китайского БЛКМ [1]



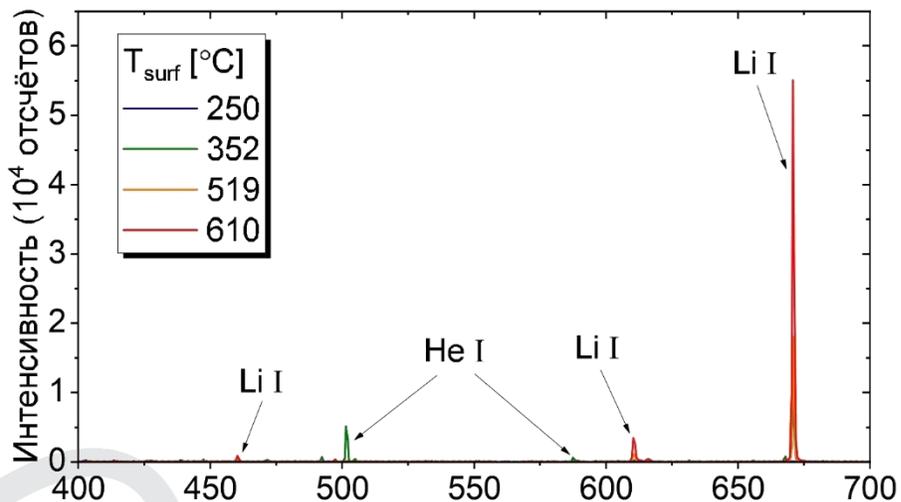
БЛКМ: Первые испытания

- Проведены первые испытания в линейном симуляторе ПР-2 (Облучение e- пучком и He плазмой)
- Время облучения >1 часа. Без подпитки литием и охлаждения образца. Нагрев поверхности до >900 °С.

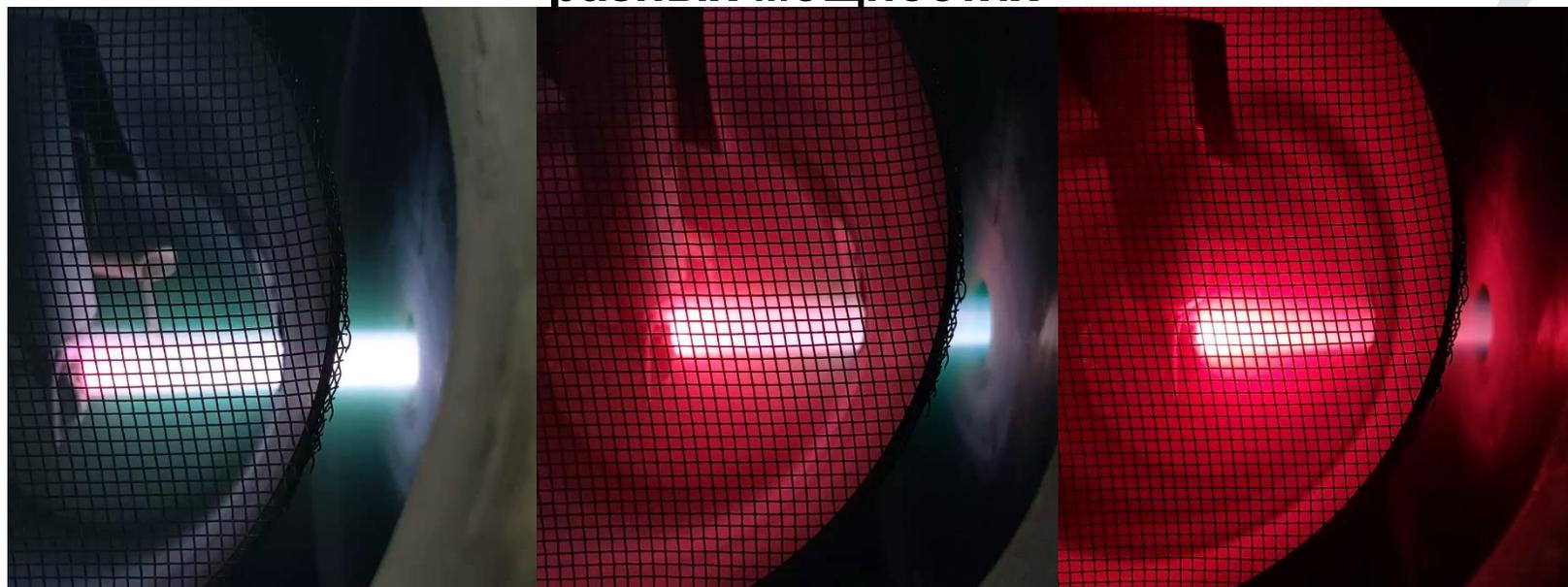
Результат:

- Образец сохранил механическую целостность.
- Наблюдается эффект КПС – подсасывание лития к нагруженной области
- В ходе распыления подавляющая доля лития (бора не видно).

Оптические спектры плазмы вблизи БЛКМ при разных температурах поверхности



Облучение БЛКМ гелиевой плазмой при разных мощностях

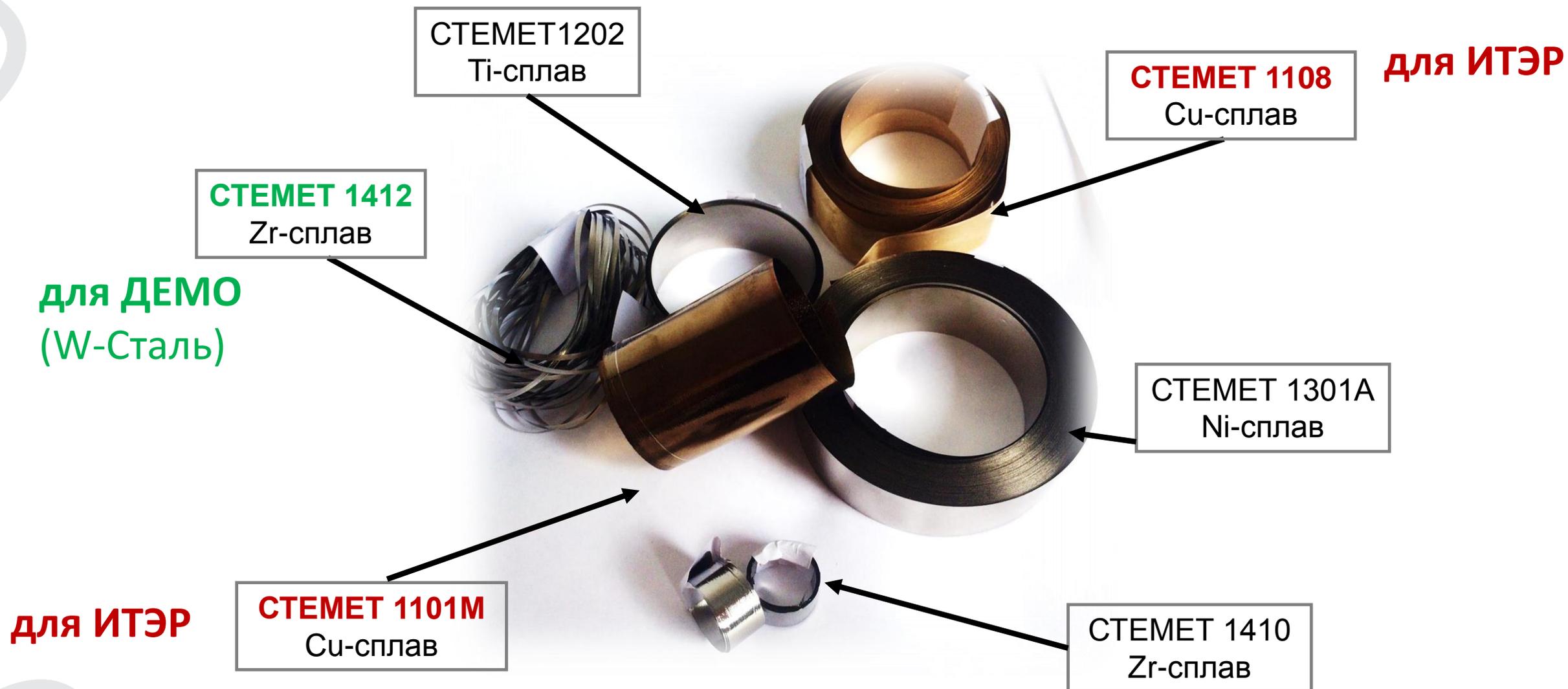


Быстрозакаленные припои СТЕМЕТ (НИЯУ МИФИ)

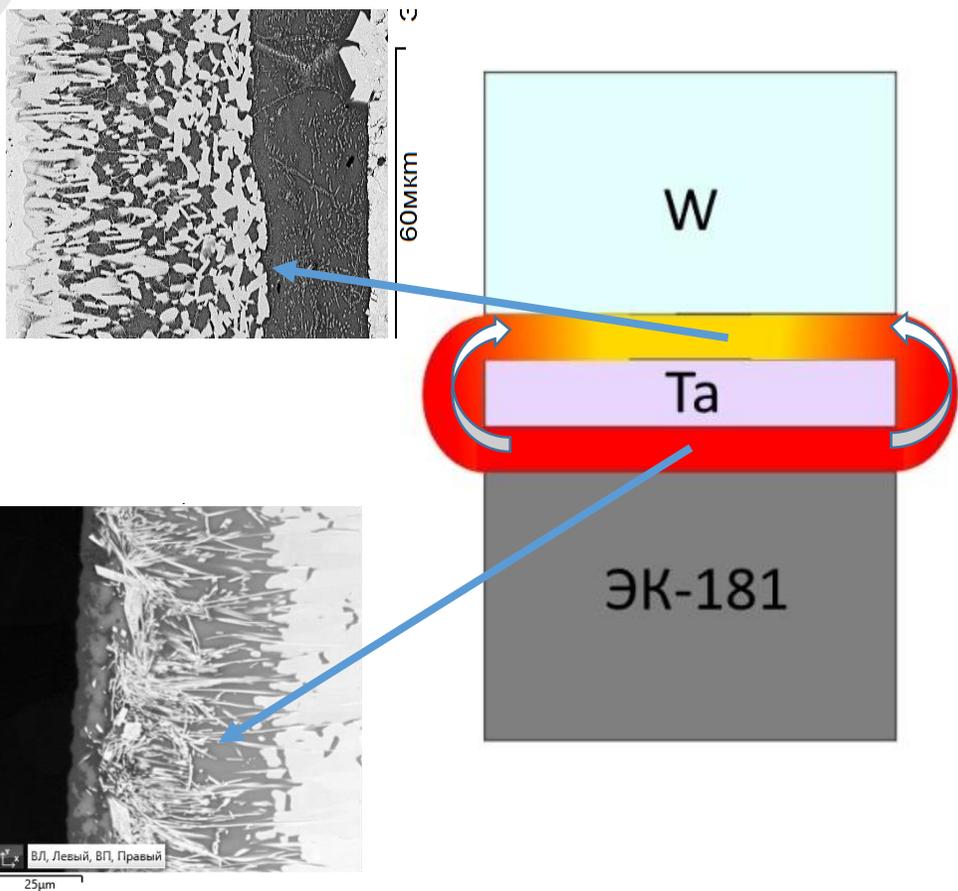
Сверхбыстрая закалка ~ 10 град/с



Разработка припоев в НИЯУ МИФИ



Испытания паяного соединения W / Сталь

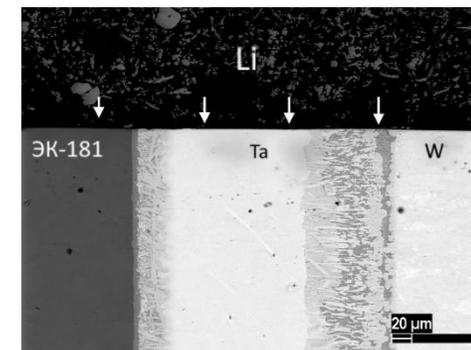


Испытания в водородной среде (300-600°C, 1-10⁵ Па)

- Хорошая стабильность при давлении водорода 1 Па во всем диапазоне температур.
- При длительной выдержке давлении >100 Па наблюдалась деградация механических свойств при температуре 300 °С.

Коррозионная стойкость в жидком литии (600°C):

- Без видимых повреждений после испытаний в течение 100 часов



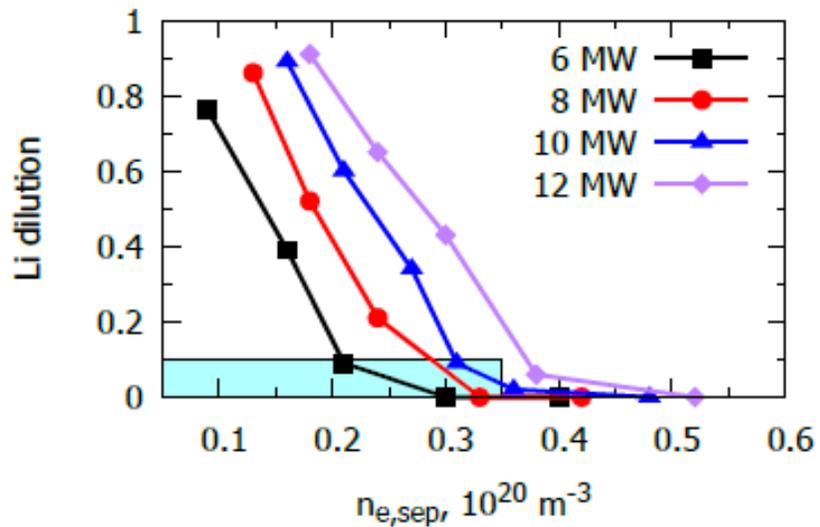
Заключение

- ❖ Для будущих реакторов требуется разработка новых решений для обращенных к плазме элементов.
- ❖ Использование жидкого лития является перспективным решением для создания обращенных к плазме элементов с возобновляемой поверхностью.
- ❖ Использование лития может также помочь реализовать более эффективные режимы плазменного разряда.
- ❖ Повышенная химическая активность лития требует новых инженерных решений и соответствующих научно-исследовательских работ.

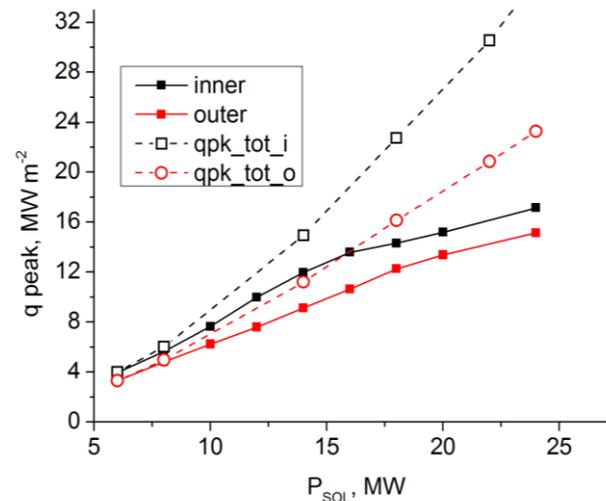
Спасибо за внимание!

Li мишени дивертора в SOLPS

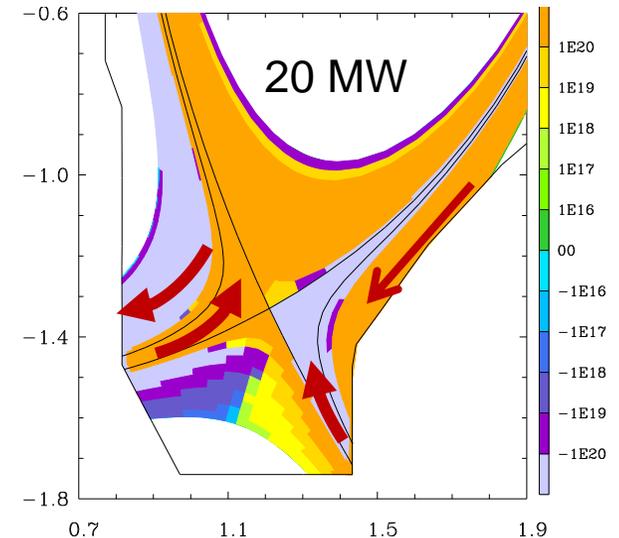
Разработан модуль эрозии лития в коде SOLPS, который учитывает физическое, термическое распыление, испарение и быструю редепозицию. С помощью этого модуля проведены расчеты для конфигурации токамака T-15МД с Li мишенями дивертора [Marenkov et. al, PPCF 2022; Marenkov et. al, NF 2022]



Операционное окно, в котором 1) загрязнение Li < 10%; 2) $n_{e,sep} <$ предела Гринвольда



Пиковая нагрузка на мишени с термоэрозией (сплошные линии) и без (пунктир). Видно экранирование мишеней Li.



Поток ионов Li вдоль поля