



**Joint Institute for High
Temperatures of the RAS**



ROSATOM



**NATIONAL RESEARCH CENTER
"KURCHATOV INSTITUTE"**



**NATIONAL
RESEARCH
UNIVERSITY**



STUDY OF THE INTERACTION OF HELIUM PLASMA WITH TUNGSTEN DIVERTOR MODULES IN THE PLM PLASMA INSTALLATION

Kavyrshin D I^{1,2,@}, Chinnov V F¹, Budaev V P², Fedorovich S D², Karpov A V²,
Martynenko Yu V², Gubkin M K², Lukashevsky M V², Zakharenkov A V², Lubenchenko A V²,
Marchenkov A Yu², Vasiliev G B², Chan Quang V², Rogozin K A² and Konkov A A²

*1 Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Izhorskaya 13 Bldg 2, Moscow 125412, Russia*

*2 National Research University Moscow Power Engineering Institute, Krasnokazarmennaya 14,
Moscow 111250, Russia*

@ e-mail: dimakav@rambler.ru

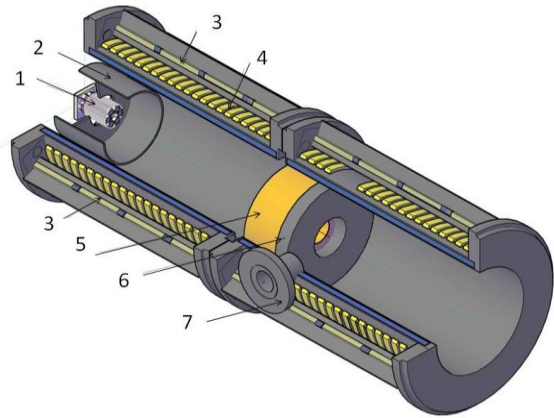
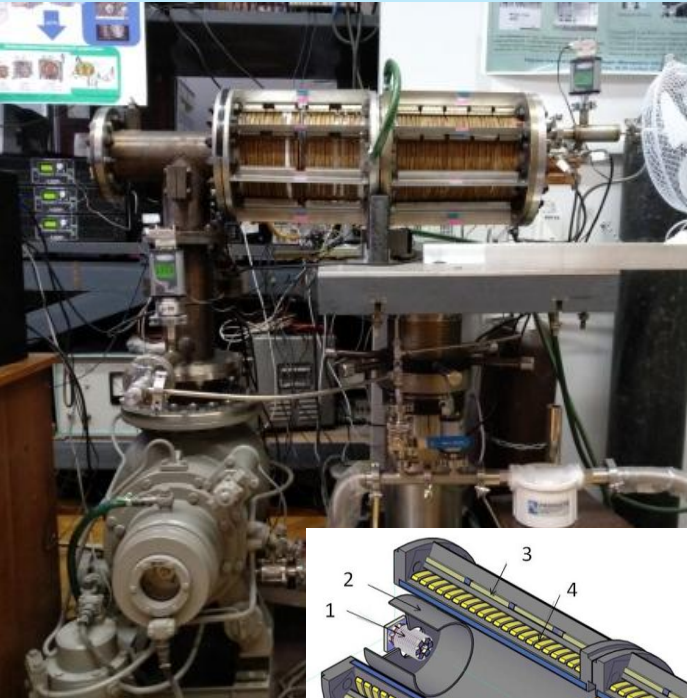
Задачи работ на установке ПЛМ

- Разработка конструкции, изготовление и тестирование в установке ПЛМ и мощными электронными пучками охлаждаемых опытных макетов внутрикамерных компонентов реактора на основе вольфрамовых модулей облицовки и жидкометаллических литиевых КПС для проведения испытаний в экспериментах на токамаках Т-15МД и Т-11М;
- Разработка и создание диагностики приповерхностной плазмы и тепловых потоков на материал в плазменных экспериментах с интенсивными дуговыми процессами на вольфрамовых и жидкометаллических литиевых поверхностях в установке ПЛМ;
- Получение опытных результатов измерения параметров экранирующей приповерхностной плазмы при интенсивной плазменно-пучковой эрозии вольфрамовых и жидкометаллических литиевых внутрикамерных компонентов в экспериментах на ПЛМ;
- Получение опытных результатов измерения характеристик и глубины рекристаллизации и повреждений вольфрамовой теплозащитной облицовки дивертора токамака-реактора в испытаниях стационарной плазменной нагрузкой более 1 МВт/м^2 в установке ПЛМ.

ПЛМ - линейная плазменная ловушка,

8-польный мультикасеп

испытание материалов стационарной плазмой



$B=0.01\text{T}-0.2\text{T}$,

$n_e=5 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$,

$T_e=2-50 \text{ эВ}$

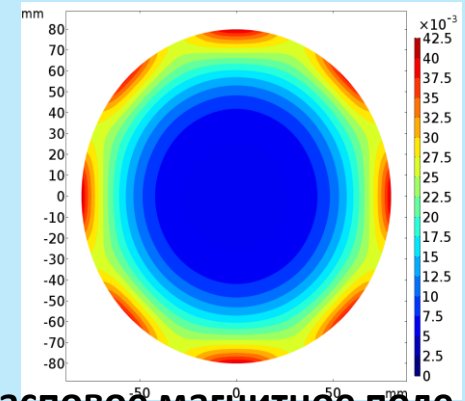
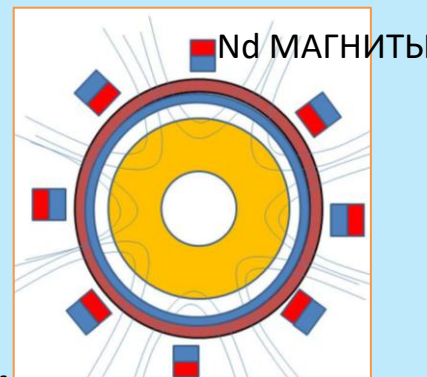
Рабочий газ – гелий, аргон, дейтерий

Стационарный разряд - до 200 мин

Нагрузка на мишени - 1-2 МВт/м².

Ионный поток - до $3 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Диаметр\длина камеры – 160\800 мм

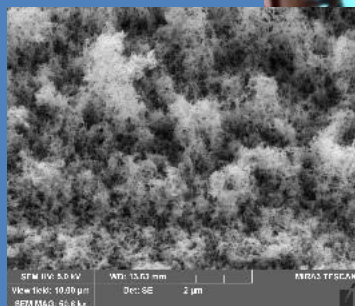
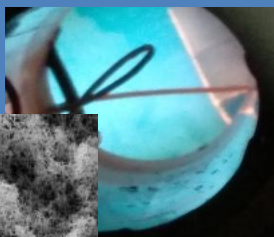


Симулятор дивертора, подобный линейным стационарным установкам AIT-PID, PISCES-B, NAGDIS-II

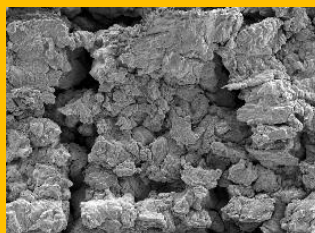
8-польное мультикасеповое магнитное поле

РАБОТЫ В НИУ «МЭИ»: ПЛАЗМЕННЫЕ, ПУЧКОВЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПОНЕНТОВ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

ПЛМ плазменная



e-beam facility
thermocyclic 1- 320 MW_T/m²



Система охлаждения >
10 MW_T/m²



0.5-2.5 МПа, 1 кг/с, 15 - 60° С,
газо-жидкостный
генератор, интенсивное
охлаждение
диверторные макеты

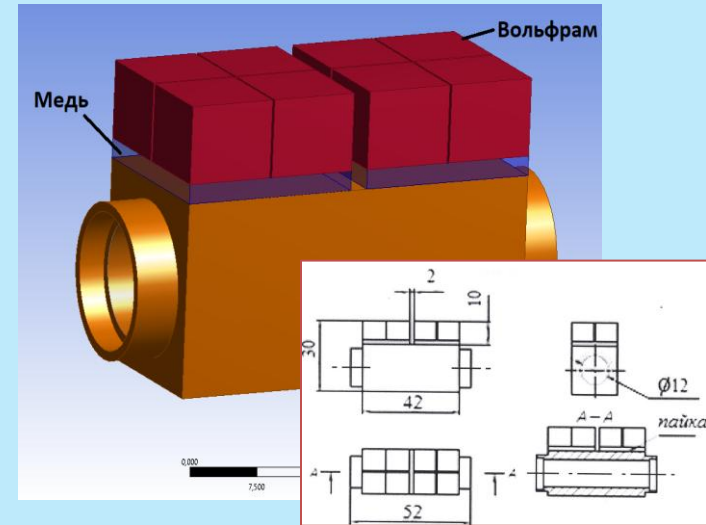


Комбинированные испытания макетов облицовки W дивертора ИТЭР

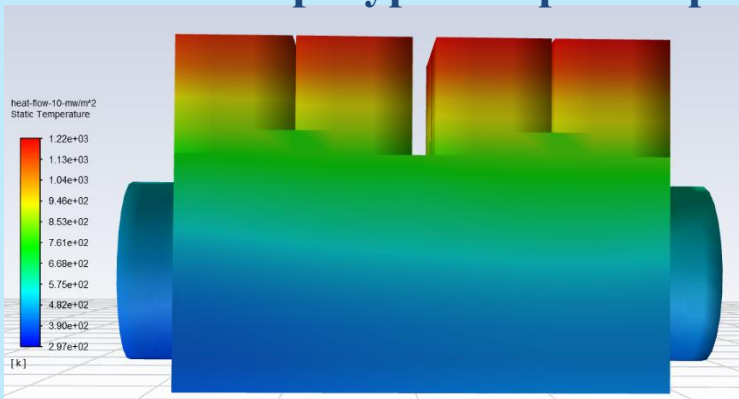
Макеты охлаждаемых вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора

- Расчет теплообмена, поток тепла на поверхность: $0,5 \text{ МВт/м}^2 - 10 \text{ МВт/м}^2$. Охлаждение через трубку водяным потоком $2,5 \text{ м/с}$.
- Гидравлический контур: расход – $18,84 \text{ л/мин}$; число Рейнольдса – 20000 ;

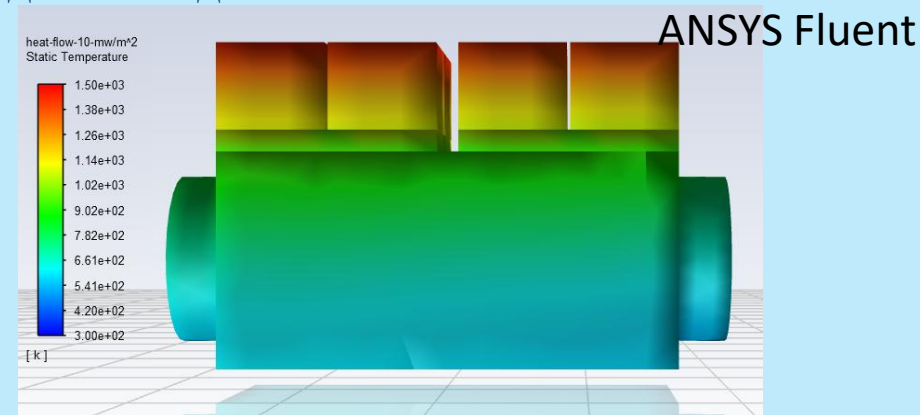
Конструкция опытного макета



Расчет температуры нагрева при охлаждении водным потоком



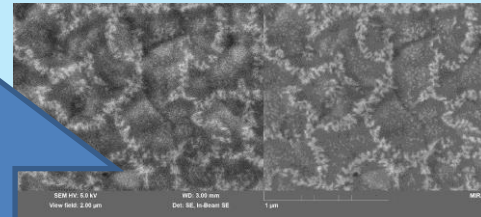
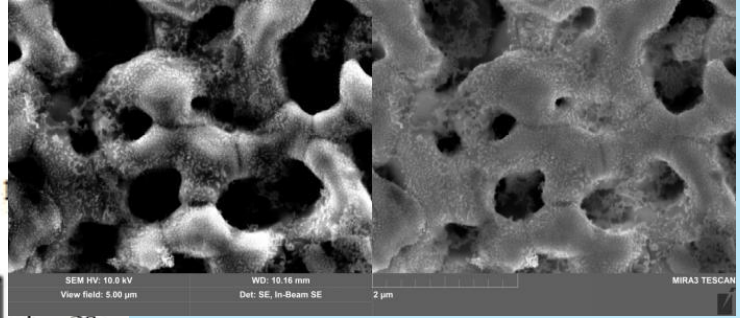
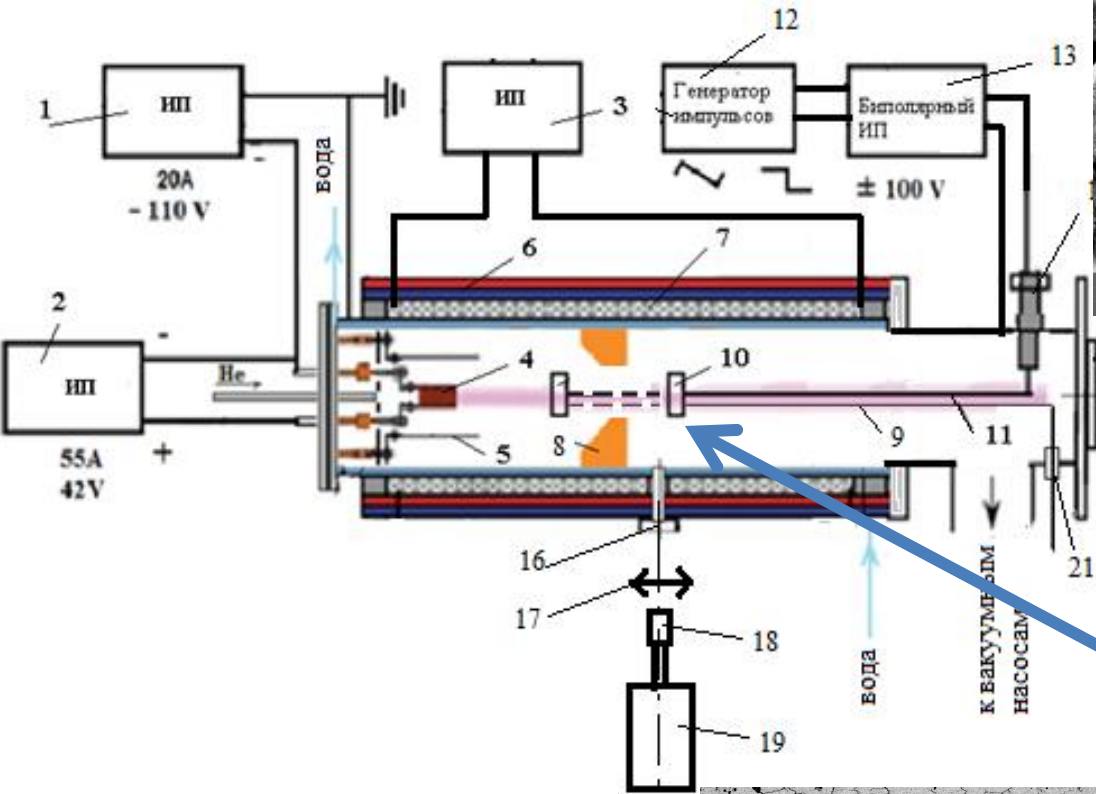
10 МВт/м^2 : Охлаждаемый поток воды с закруткой - $T_w = 1220 \text{ K}$



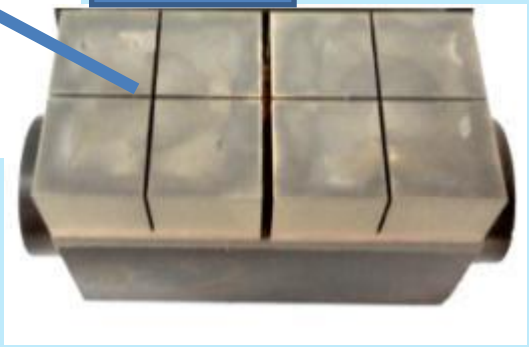
10 МВт/м^2 : Охлаждаемый поток воды без закрутки 10 МВт/м^2 : $T_w = 1500 \text{ K}$



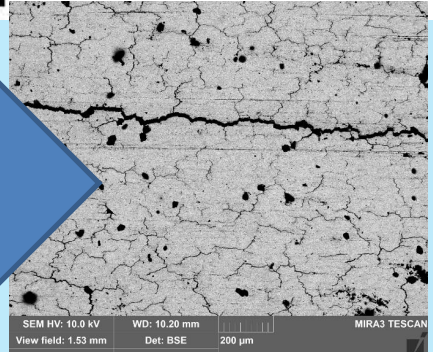
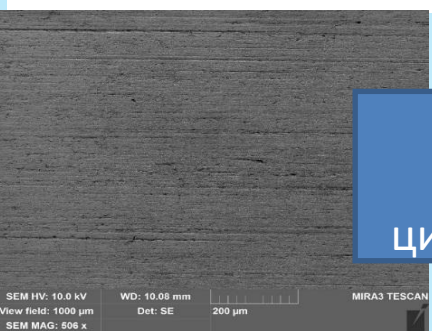
Испытание W модуля дивертора в плазме ПЛМ после пучковых испытаний - моделирование переменных нагрузок при ЭЛМах



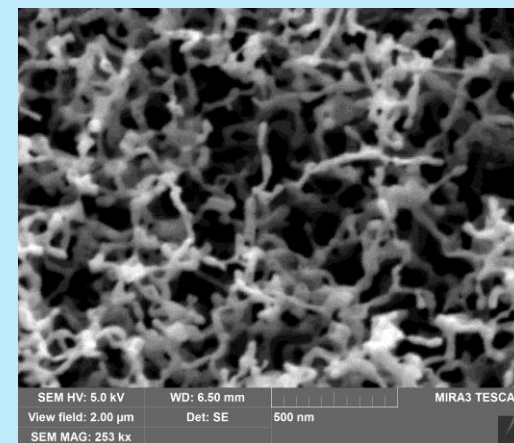
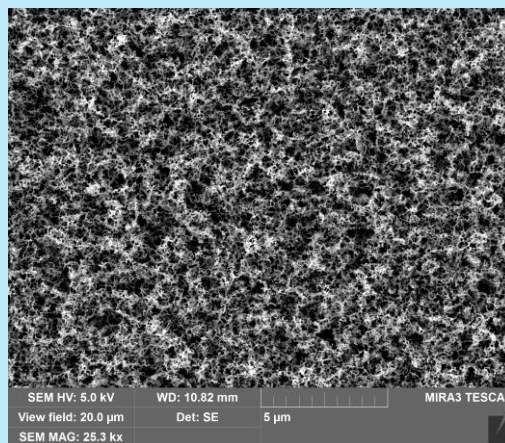
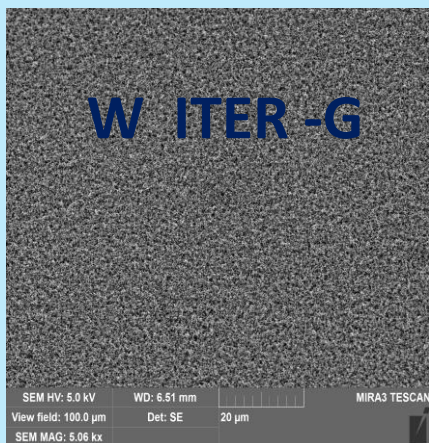
плазма
ПЛМ
200
МИН



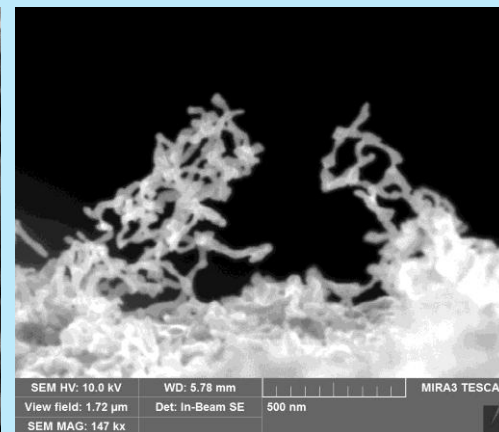
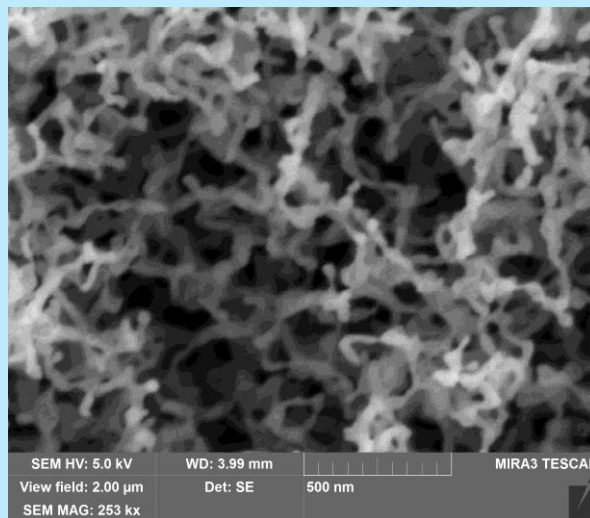
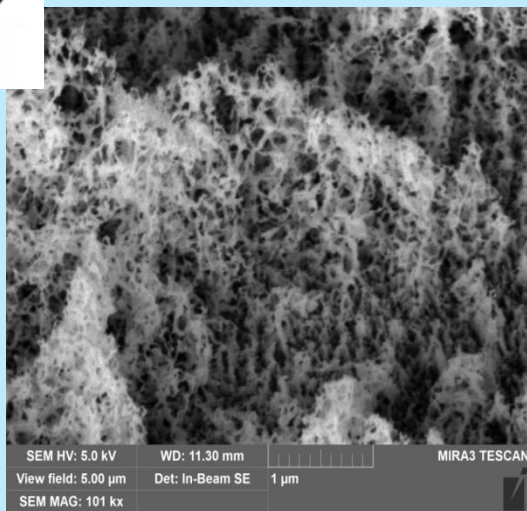
е-пучок
термо-
циклирование



Рост наноструктурных слоев типа пух (“fuzz”) на вольфраме в ПЛМ, нановолокна с диаметром $\sim 20\text{-}50\text{ nm}$, толщина слоя $\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$



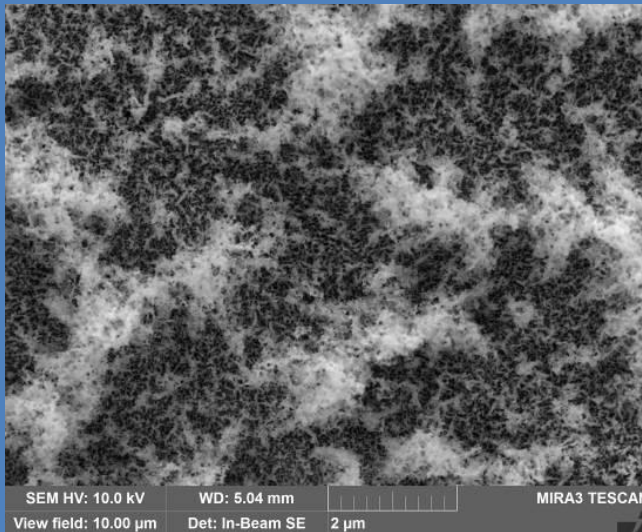
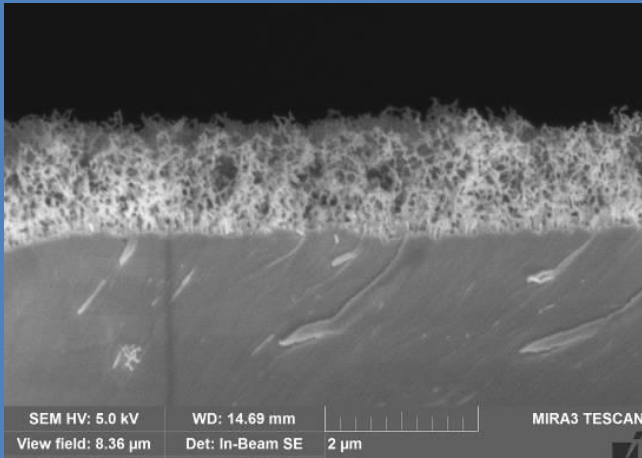
Martynenko e a Plasma Physics Reports 38 (2012) 108



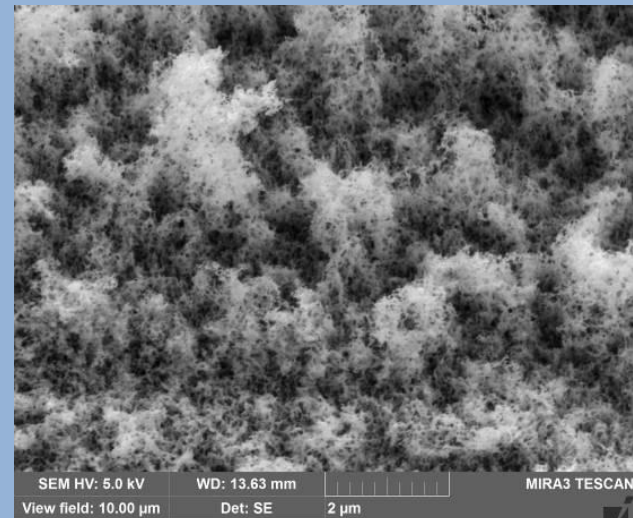
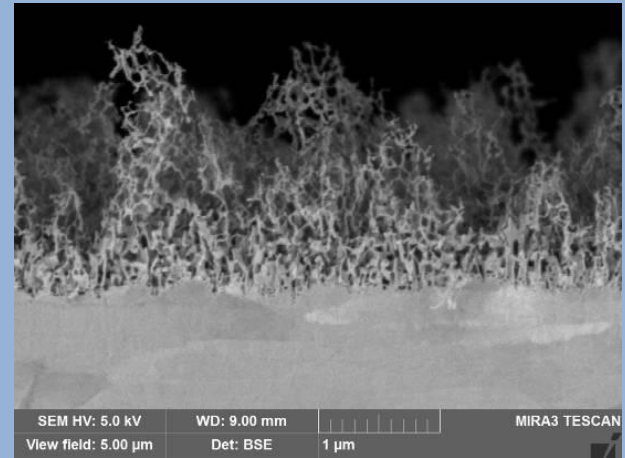
В ИТЭР ожидается рост пуха на диверторных пластинах на большой площади.

Наблюдается универсальность роста, на многих металлах [Kajita e a Scientific Reports 8 (2018) 56]

Рост плотного и редкого пуха на W



редкий “fuzz”, $t_w = 980$ °C



плотный “fuzz”, $t_w = 920$ °C

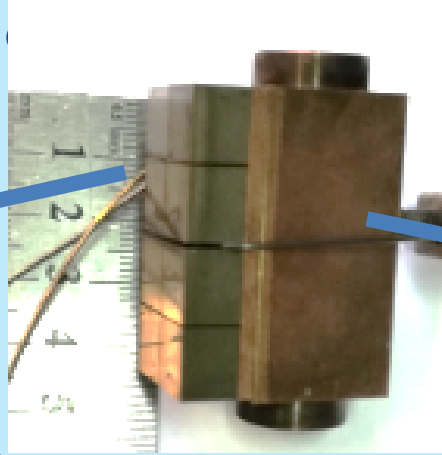
ПЛМ гелиевая плазма ~100 минут, рост пуха толщиной ~ 1.6 μm

Тепловые испытания охлаждаемого W макета теплозащитной облицовки дивертора : успешные испытания до порогового предела 17 кВт

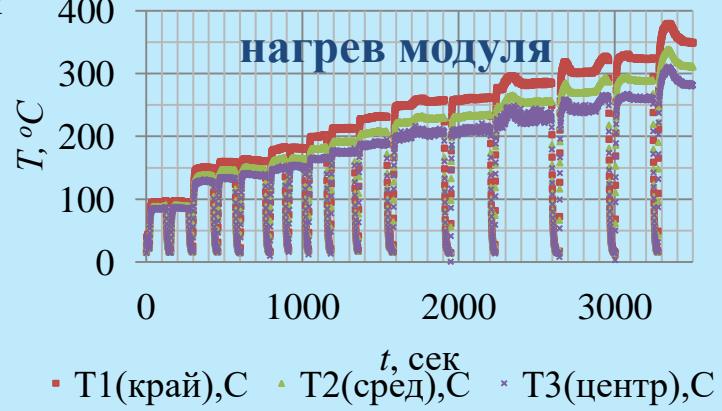
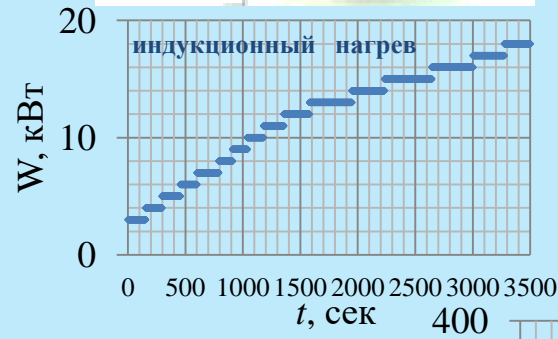


- система охлаждения
газо-жидкостный поток из сопла форсунки
- расход воды до 250 л/час;
 - расход воздуха до 10 м³/час;
 - давление воды от 1 до 6 атм;
 - давление воздуха от 1 до 8 атм;
 - температура теплоносителя на входе 10 - 30°C;
 - охлаждение макетов 1-10 МВт/м²;

Опытный W макет



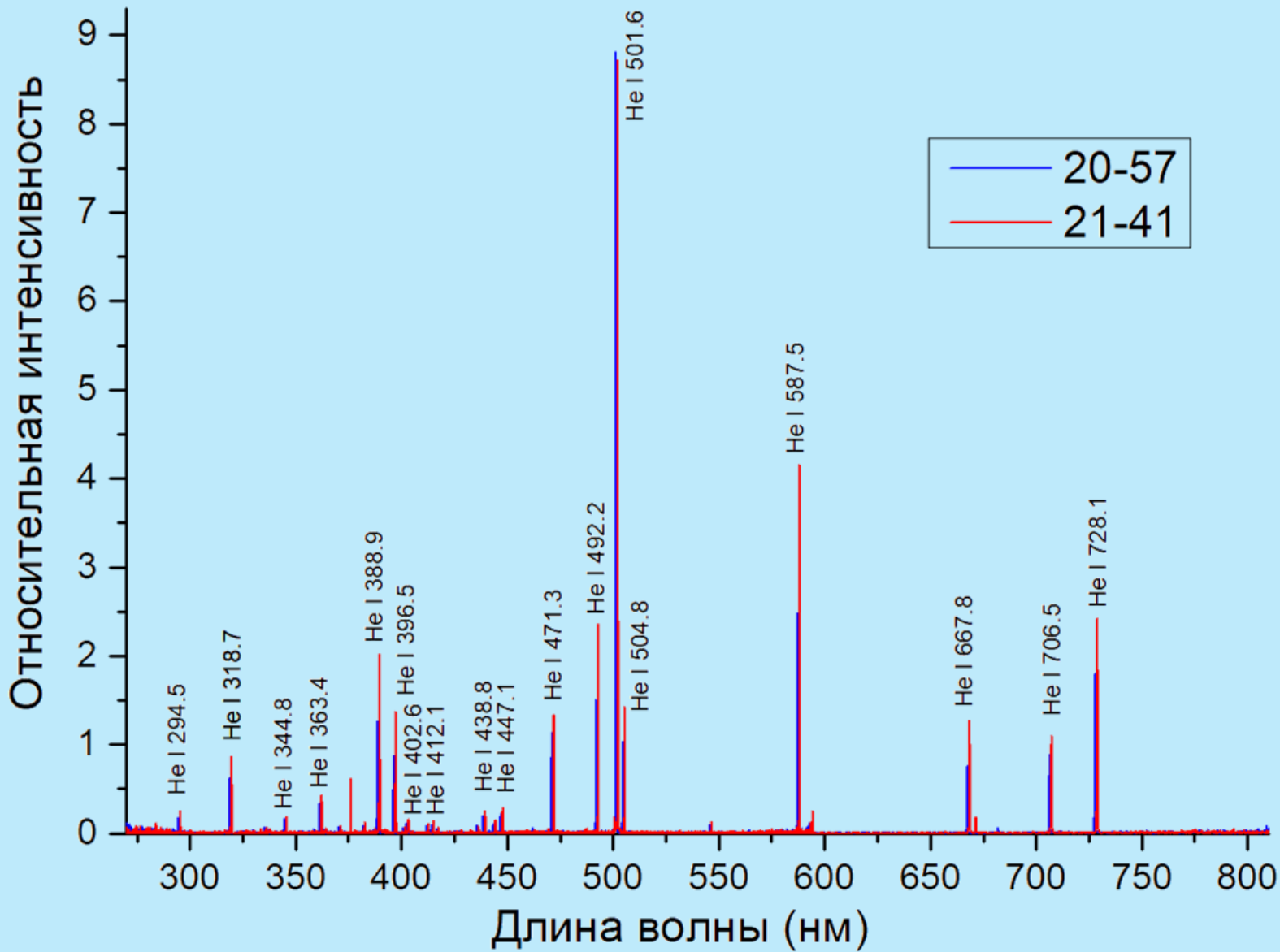
мощный индукционный нагрев
40 кГц, 1-18 кВт



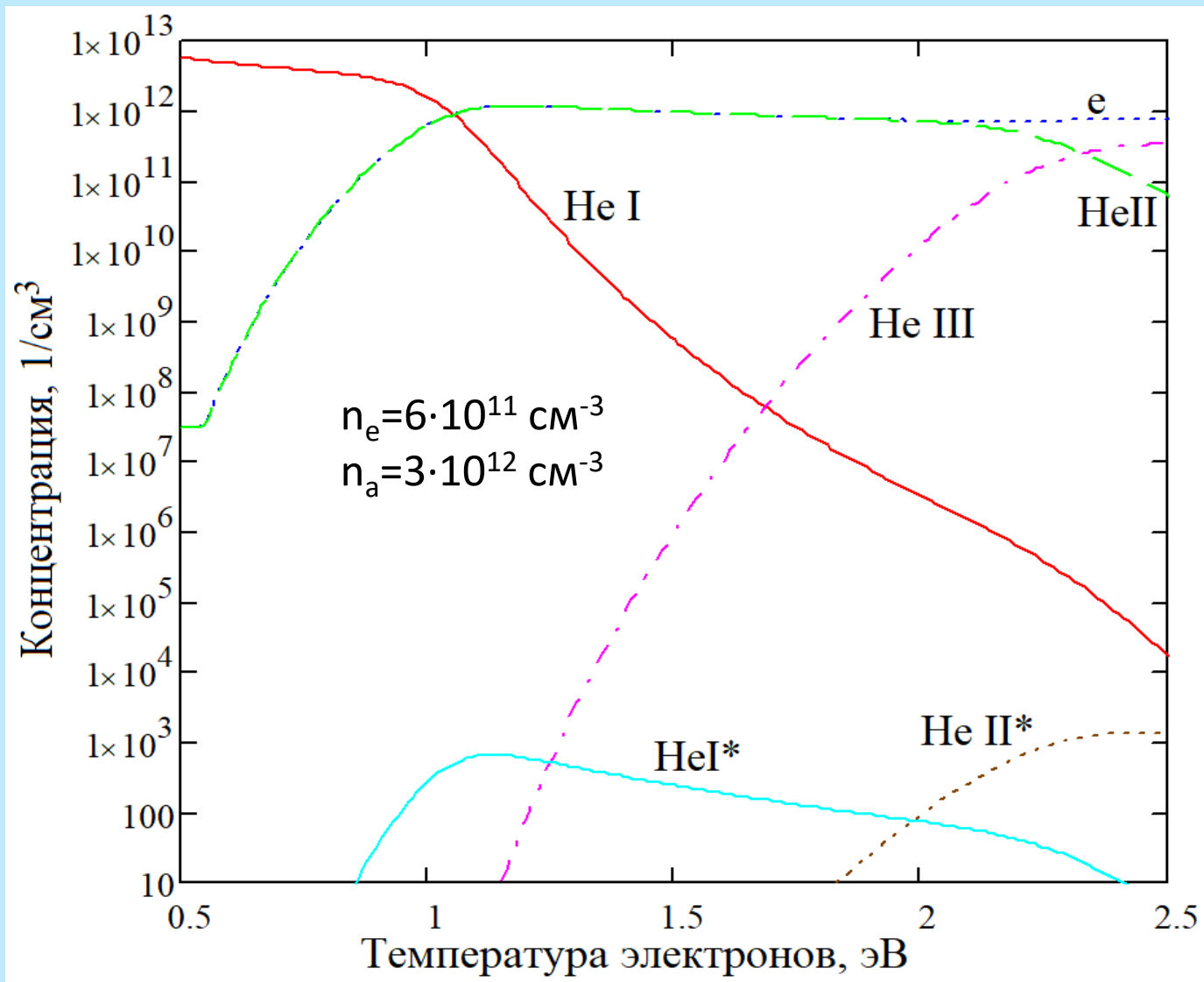
Тепловые испытания охлаждаемого W макета теплозащитной облицовки дивертора при мощности индукционного нагрева > 17 кВт



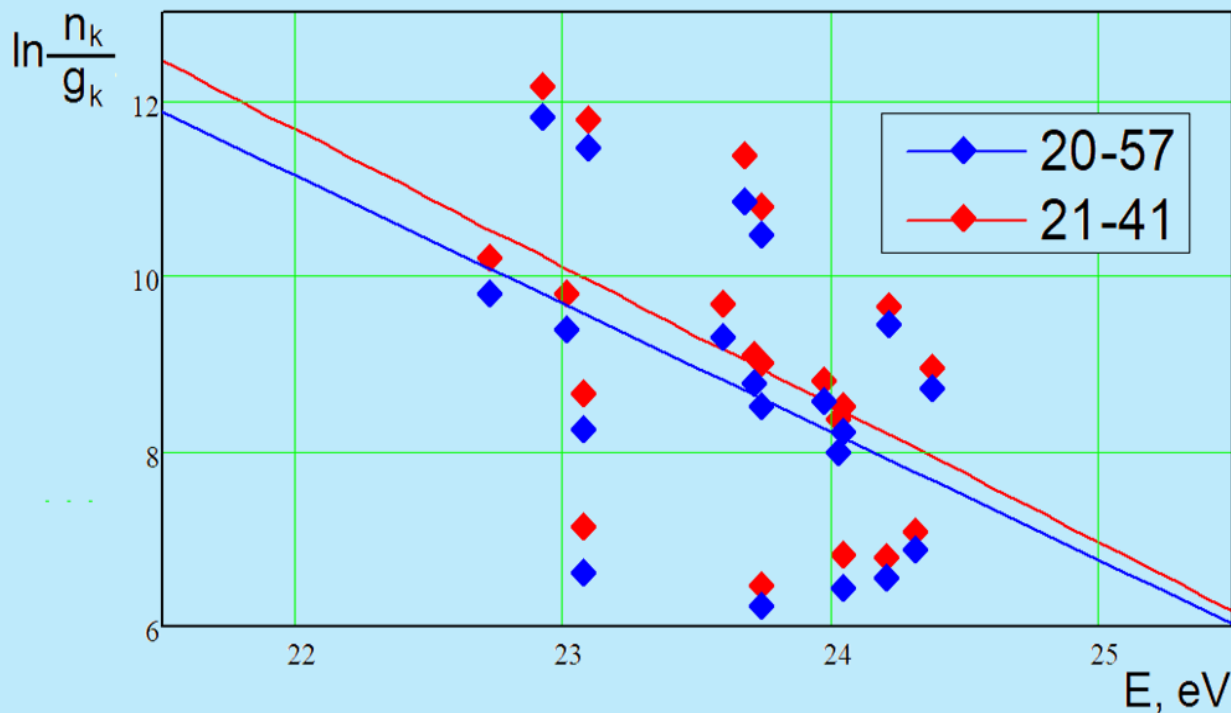
Повреждение макета при перегреве мощностью индукционного нагрева 18 кВт в течение ~60 секунд, температура медного модуля достигла 533 °С



РАВНОВЕСНЫЙ СОСТАВ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

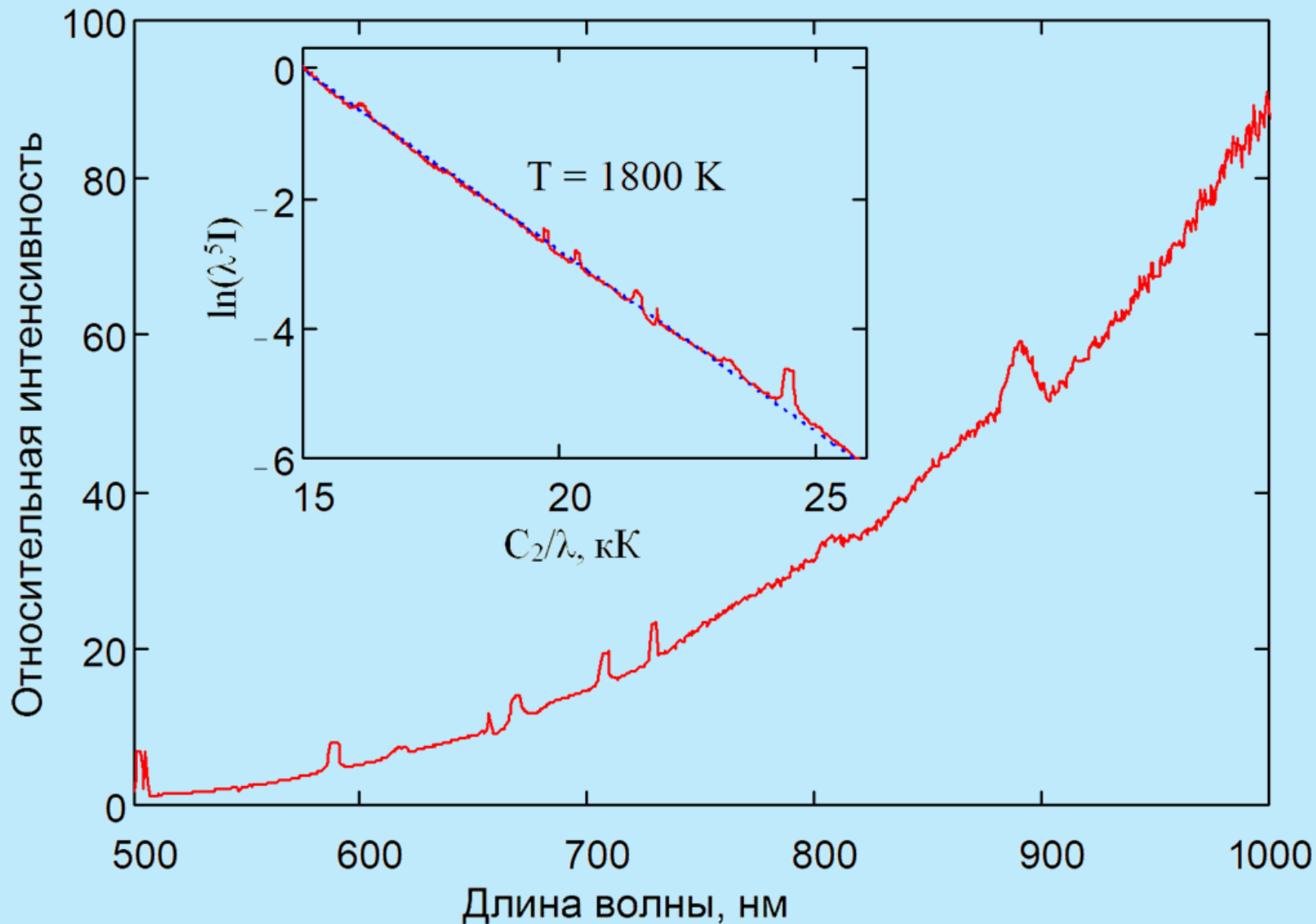


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТОМОВ ГЕЛИЯ ПО ВОЗБУЖДЕННЫМ СОСТОЯНИЯМ



Экспериментальные точки имеют очень большой разброс и не лежат на одной прямой, а оцененные по их массиву “температуры распределения” оказываются нереалистично низкими: всего 7400 К для момента времени 20-57 и 8000 для момента времени 21-41, что указывает на наличие в плазме неравновесности распределения заселённости возбужденных состояний атома гелия по энергиям ионизационного типа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА МЕТОДОМ КООРДИНАТ ВИНА



Методика эксперимента

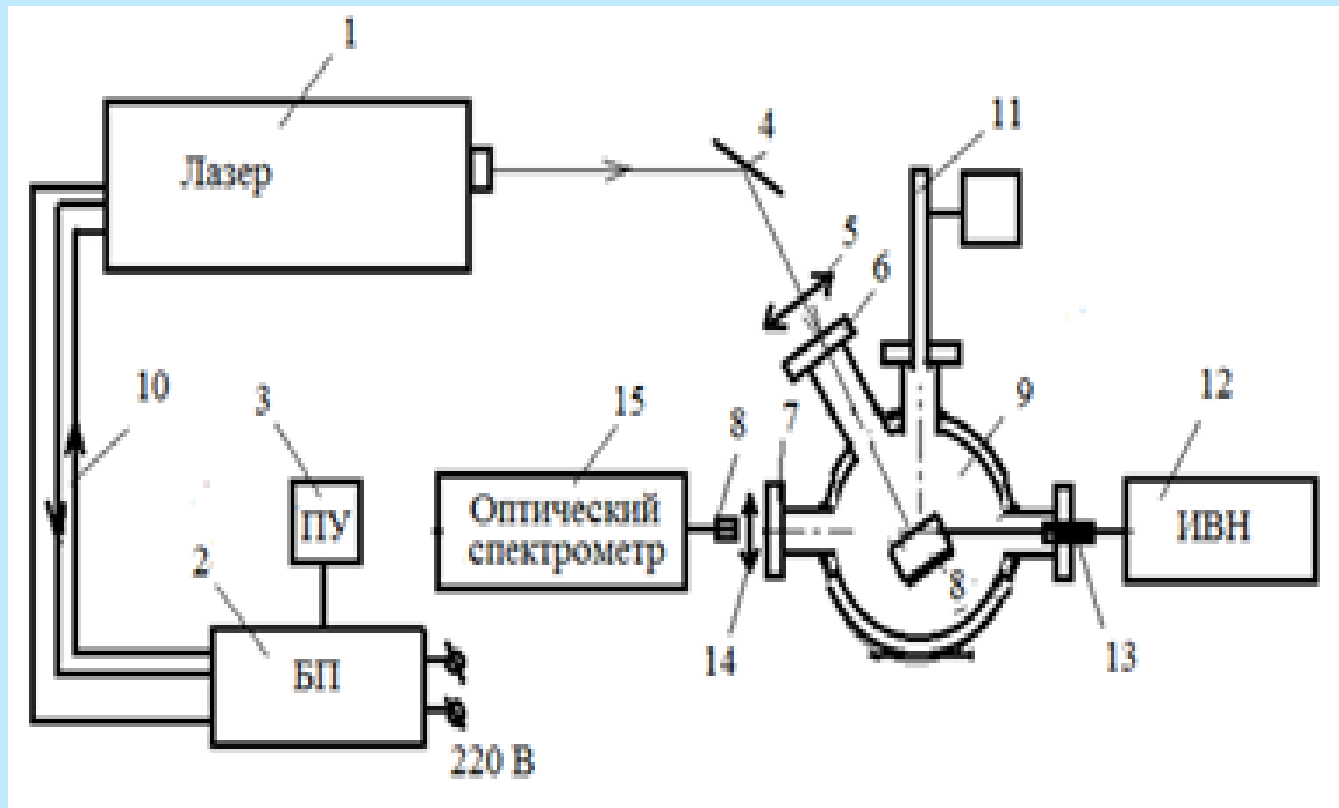
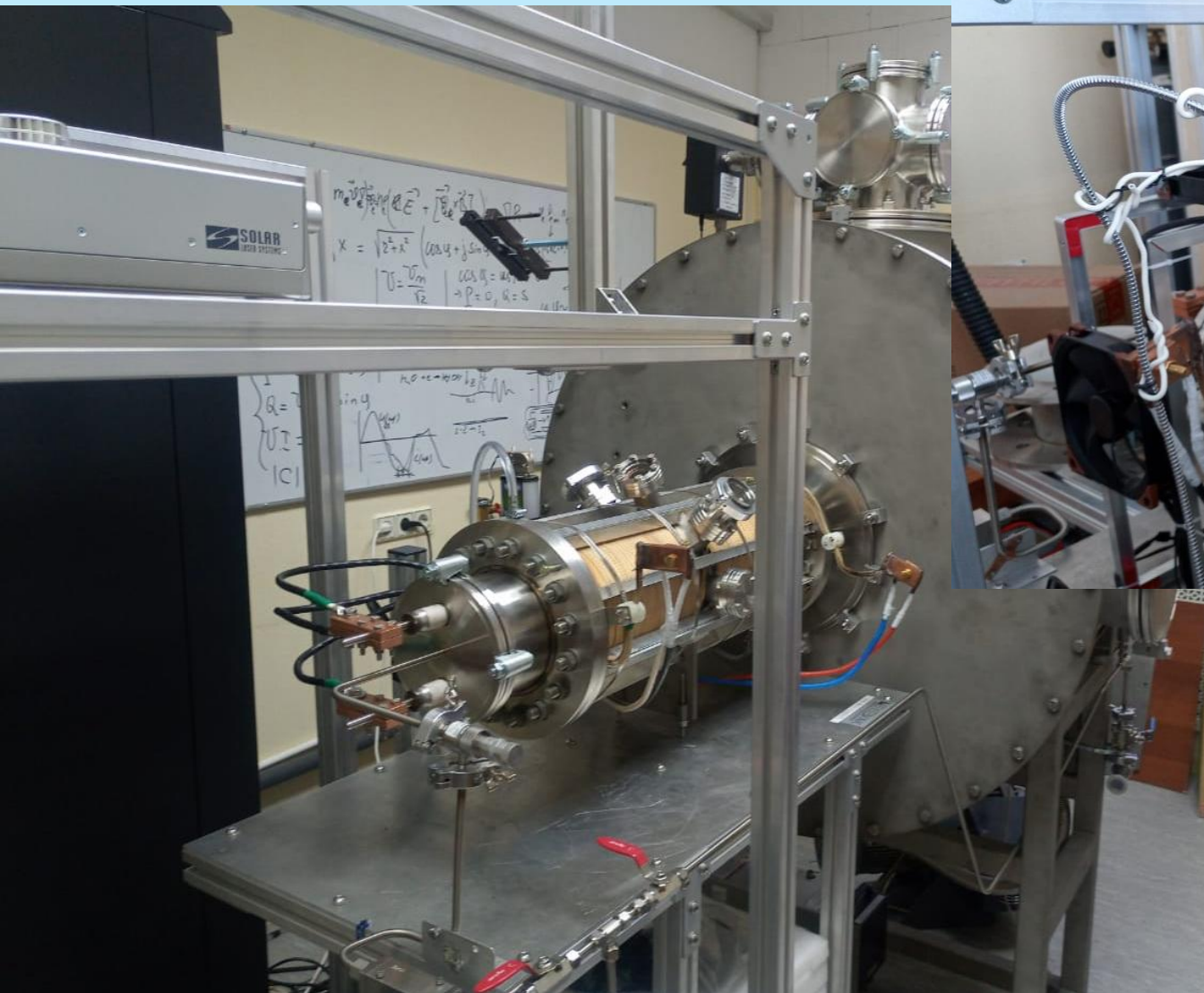


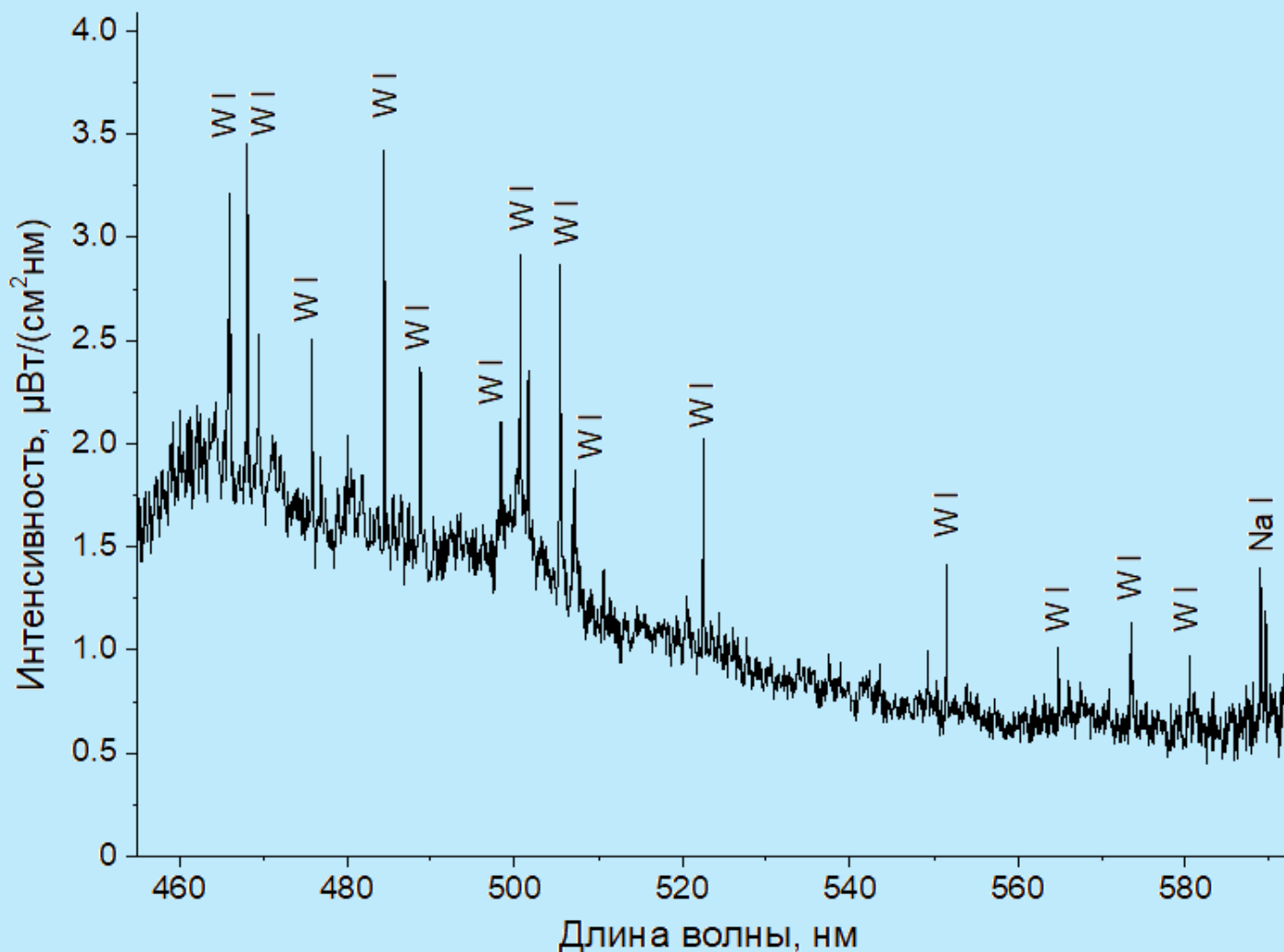
Схема системы генерации дуг в усовершенствованной плазменной установке ПЛМ:

1 – импульсный лазер; 2 – блок питания лазера; 3 – пульт управления лазером; 4 – зеркало; 5 – кварцевая линза; 6, 7 – боросиликатные окна; 8 – оптоволоконный кабель; 9 – высоковакуумная охлаждаемая камера плазменной установки ПЛМ; 10 – замкнутый контур охлаждения лазера; 11 – квадрупольный масс-спектрометр; 12 – источник высокого напряжения; 13 – токоввод; 14 – кварцевая линза, 15 – спектрометр

УСОВЕРШЕНСТВОВАВАННАЯ ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПЛМ С ЛАЗЕРНЫМ СТЕНДОМ



СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ЛАЗЕРНОГО ФАКЕЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОЛЬФРАМОВОГО МОДУЛЯ



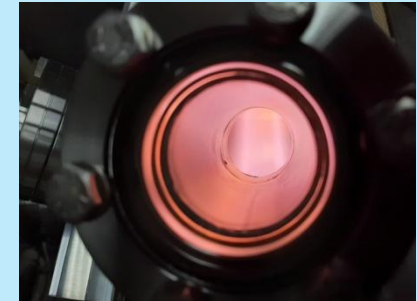
**1 - один импульс,
2 - 10 импульсов,
3 - 100 импульсов**

Первая плазма в усовершенствованной установке ПЛМ-М

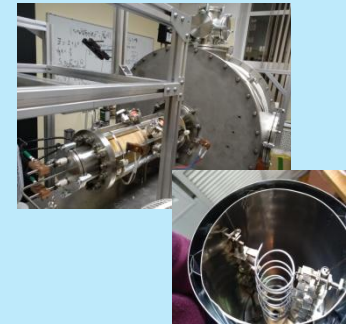


ПЛМ-М

	ПЛМ	ПЛМ-М
Диаметр камеры/пучка, см	16/3,5	16/3,5-10
В, Тл	0.01-0.2	0.02-2
$n_e, \text{м}^{-3}$	5×10^{18}	$10^{19} - 10^{20}$
Те, эВ	2-50	10-100
Ионный поток, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	3×10^{21}	$10^{23} - 10^{25}$
Нагрузка на мишени МВт/м^2	1-5	>10
Стационарный разряд	более 200 мин	
Рабочий газ – гелий, дейтерий, Ar		



пуск 2021 г, разряд, > 1 час
гелиевая плазма, 22,2 А, 5 кВт



ПЛМ - М: не имеет аналогов в России, будет в ряду самых мощных уникальных установок в мире (MAGNUM-PSI ЕС, MPEX США)

Эксперименты в 2021-2024:

- полномасштабные испытания W и жидкометаллических (Li, Sn, Li/Sn КПС) внутрикамерных конструкций ТЯР;
- мощная лазерная нагрузка совместно с плазмой: дугообразование над вольфрамовым пухом, моделирование ЭЛМов в плазме, экранирование испаренным W ;
- “detached” мода;
- управление потоками, дуговыми процессами, турбулентностью ;
- стационарные реакторные технологии дивертора и охлаждения.

Выводы



- Сооружена плазменная линейная ловушка ПЛМ – 8-польный мультикасп, симулятор дивертора для испытаний материалов термоядерного реактора стационарной плазмой с нагрузкой 1-5 МВт/м², длительностью > 200 минут.
- Проведены комбинированные испытания охлаждаемого вольфрамового модуля теплозащитной облицовки дивертора мощным электронным пучком 50 МВт/м² и последующей стационарной плазмой ПЛМ ~1 МВт/м²: обнаружен рост наноструктурированного пуха высокой пористости.
- Исследованы условия роста наноструктурных слоев типа пух на вольфраме при плазменной стационарной нагрузке.
- В модернизированной плазменной установке ПЛМ-М (ПЛМ-2) получена первая плазма и начаты эксперименты.

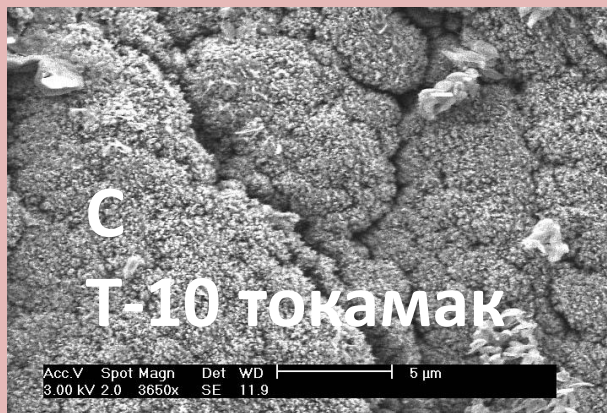
1. V. P. Budaev et al. Journal of Physics: Conference Series 891 (2017) 012304
2. V. P. Budaev et al. Nuclear Materials and Energy 25 (2020) 100816
3. V. P. Budaev et al. Nuclear Materials and Energy 25 (2020) 100834
4. V. P. Budaev et al. Fusion Engineering and Design 155 (2020) 111694

Работа поддержана: плазменные и электронно-лучевые испытания проводились при поддержке проекта Госкорпорации "Росатом" № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д, анализ структуры поверхности-при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, оценка радиационных эффектов – при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, рентгеновский анализ – при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

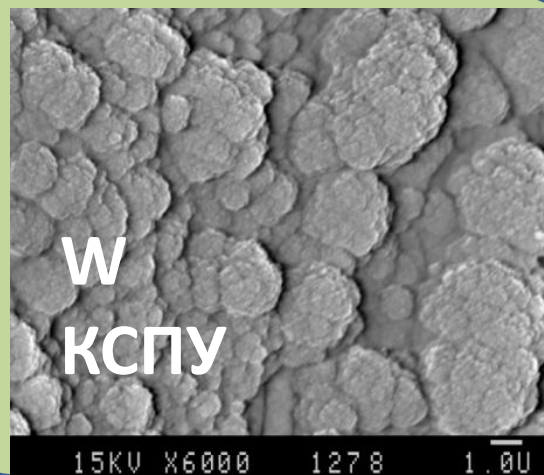
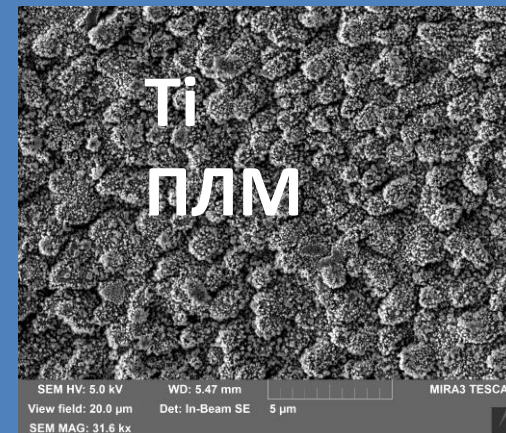
THANK YOU FOR YOUR ATTENTION!

Универсальные свойства роста наноструктурной поверхности

Неоднородная стохастическая кластеризация поверхности при действии приповерхностной плазмы: самоподобная иерархическая гранулярность - масштабная инвариантность

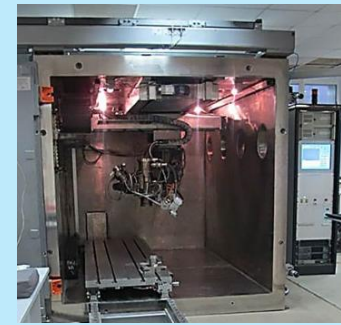


Фрактальный рост наноструктурной поверхности
Структуры типа «цветная капуста» и «пух» - вольфрам, углерод, титан, бериллий и др.

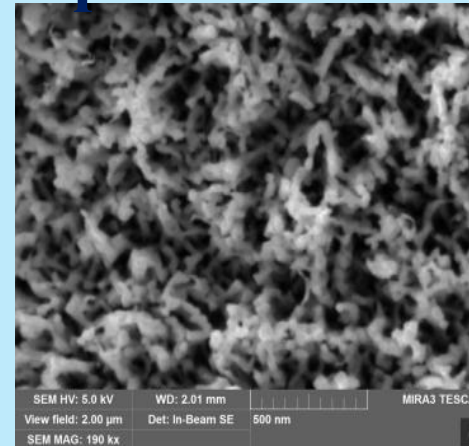


Новые наноструктурные материалы для термоядерных, атомных, химических, биомедицинских применений

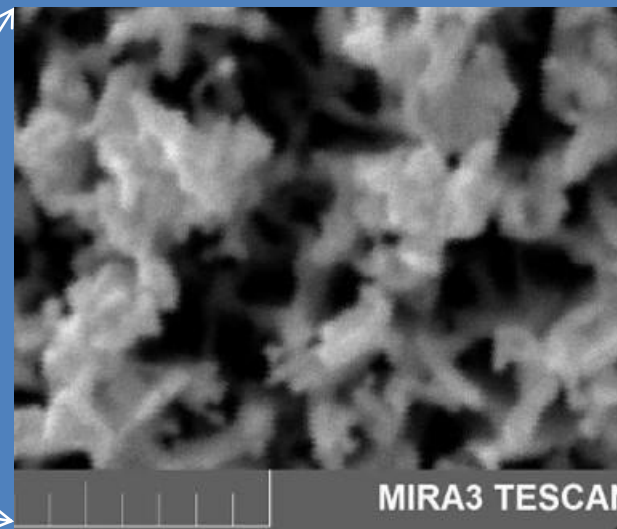
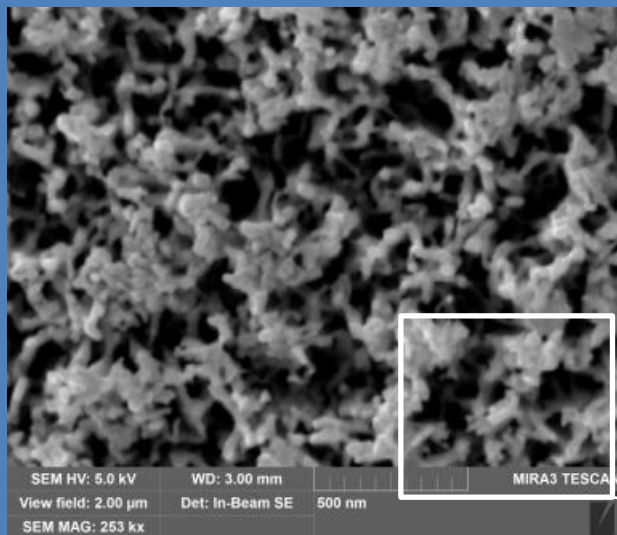
Испытание плазменного пуха мощным электронным пучком - моделирование ЭЛМ



Пух на ITER-grade W
после плазмы в ПЛМ



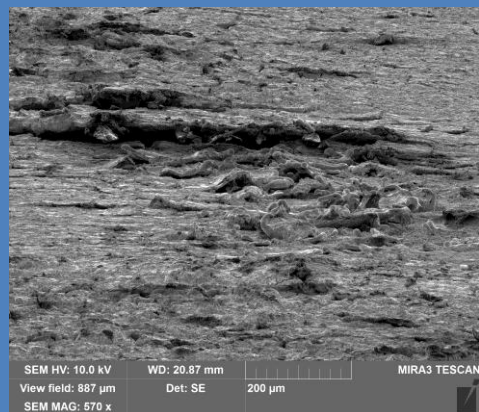
Электронно- пучковая нагрузка 49 MW/m^2 не привела к значительному повреждению слоя вольфрамового пуха



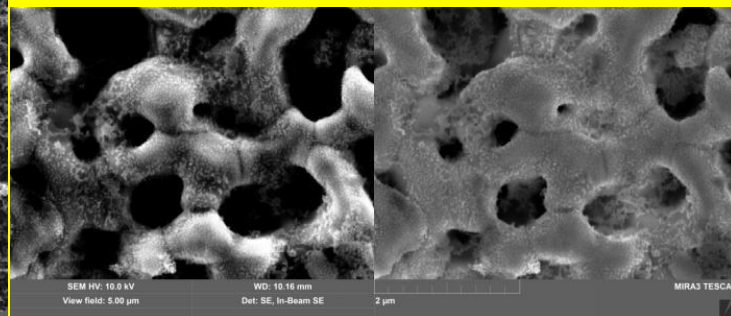
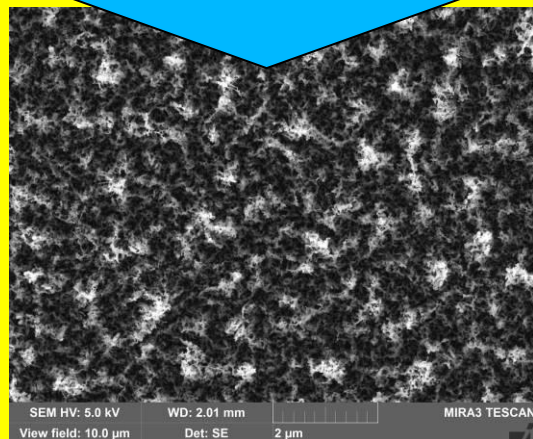
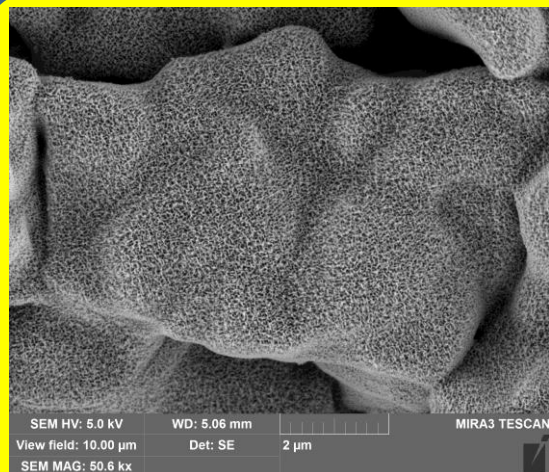
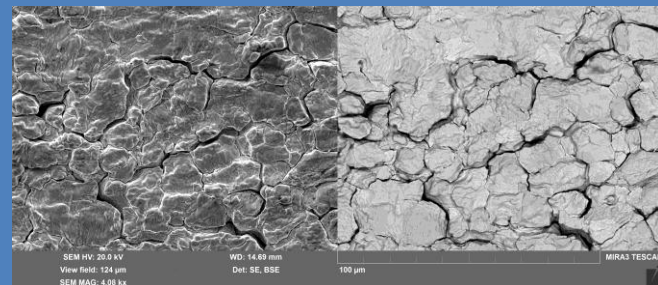
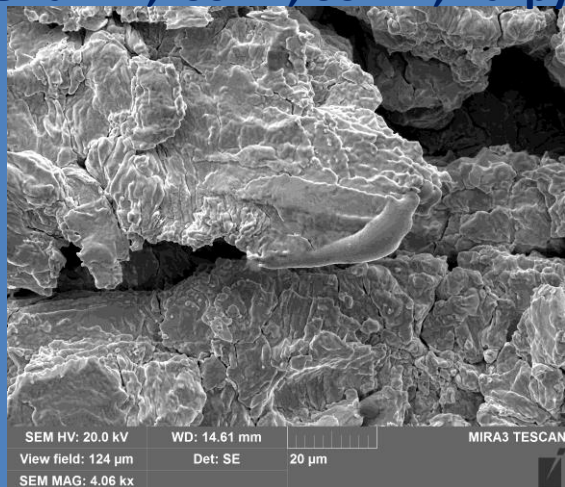
49 MW/m^2 - незначительное оплавление краев нановолокон

Комбинированное испытание вольфрама ITER-grade VM-P мощной электроннопучковой и последующей плазменной стационарной нагрузками

е-пучковые испытания, 60 kV, 60 kW, нагрузка - 40 MW/m²

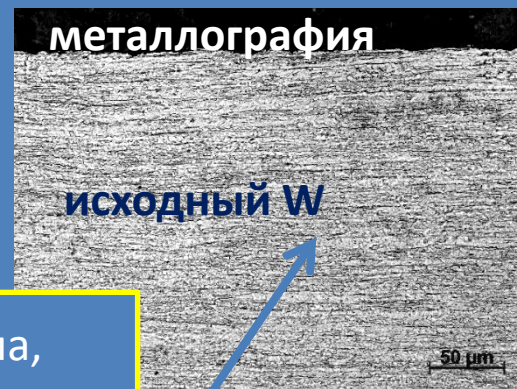


ITER-grade W VM-P

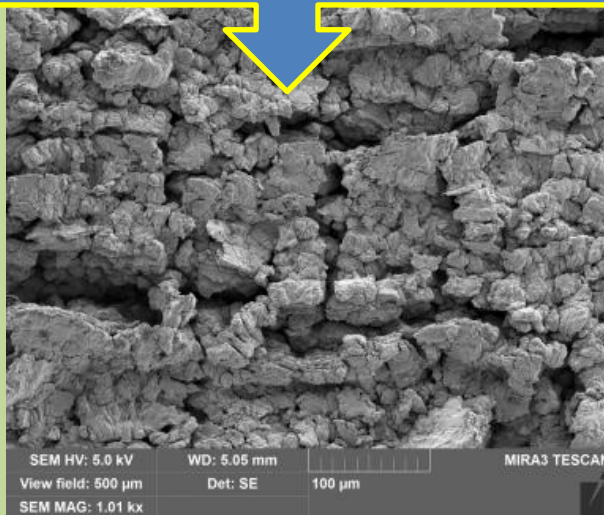
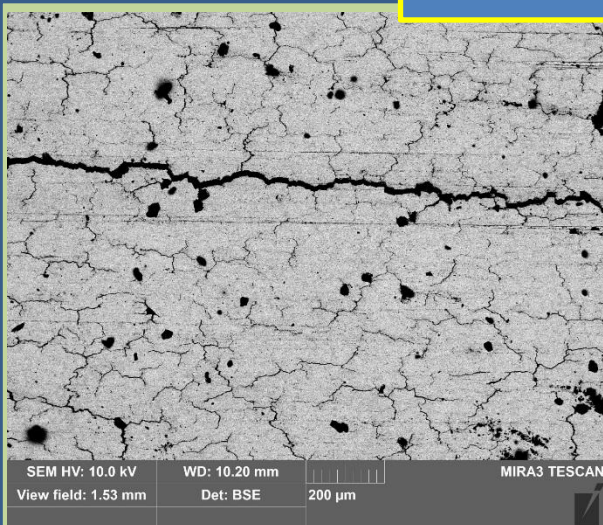


ПЛМ облучение гелиевой плазмой, 200 минут, 0.5-1 MW/m², нагрев поверхности t=900 °C, рост наноструктурированной поверхности типа пух на шероховатой поверхности, нановолокна диаметром 20-50 nm

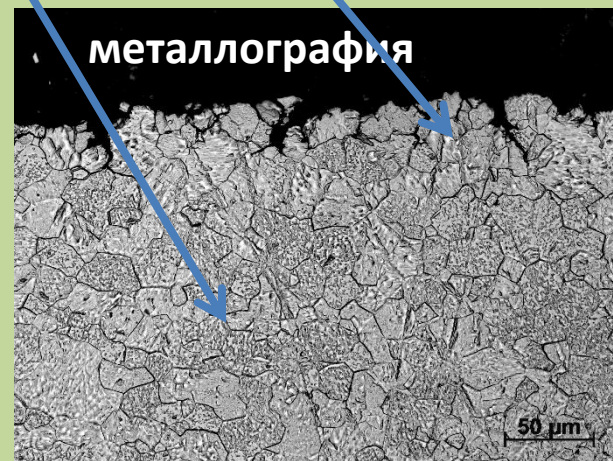
Термоциклические испытания мощным электронным-пучком диверторных модулей из вольфрама ITER-grade VM-P



е-пучок 50 MW/m^2 , 70mA/60 кV, 62 цикла,
поверхность нагрелась до 1400°C



твёрдость :
исходный металл $480 \pm 20\text{HV}0.5$
поверхностный слой $320 \pm 40\text{HV}0.5$
переходный слой $410 \pm 20\text{HV}0.5$



трещины длиной 3 mm, шириной 0.1-20 μm
рекристаллизация на глубину до 0.4-1 mm

Пучковые термоциклические испытания опытных макетов вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора Моделирование ЭЛМов в крупномасштабном токамаке

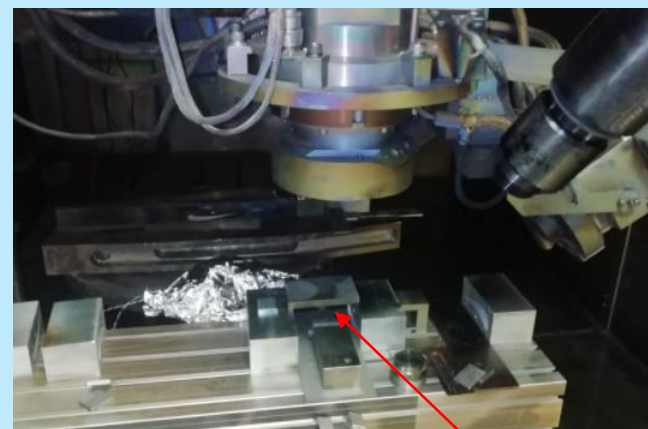


Электронно-лучевая установка АЭЛТК-344-12

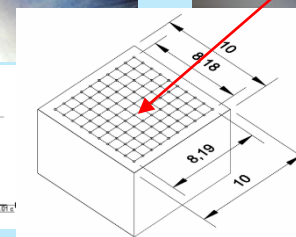
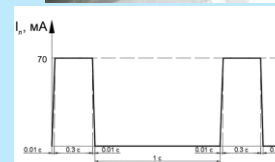
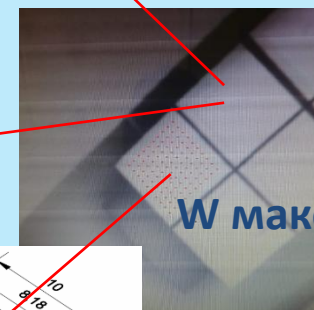
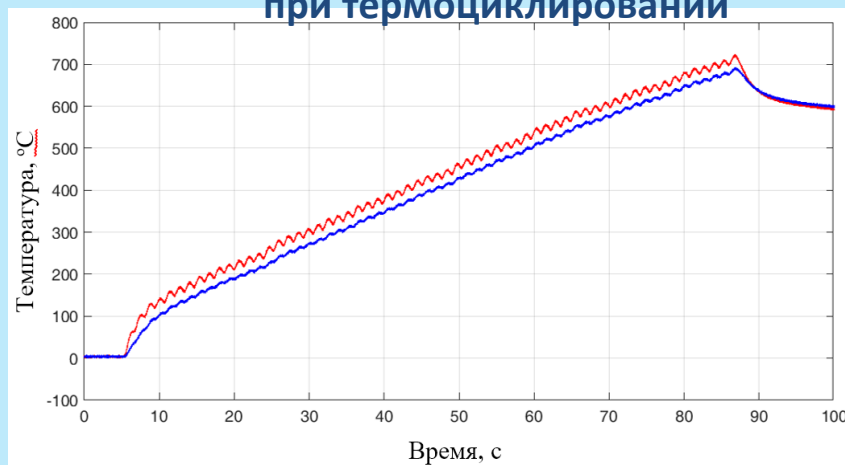
2 макета испытаны термоциклическими нагрузками - 50 МВт/м².

Ток/напряжение пучка 70мА/60 кВ. Растровая развёртка пучка с сеткой 10x10 мм² и частотой 50 Гц. Суммарное количество узлов развертки 100, расстояние между узлами (площадь каждого 8,1 мм²) растровой развёртки 0.819 мм.

Температура W поверхности макетов достигала более 1400°C, вблизи охлаждаемой Cu трубки 707/719°C достигнуто при 60/62 цикла.

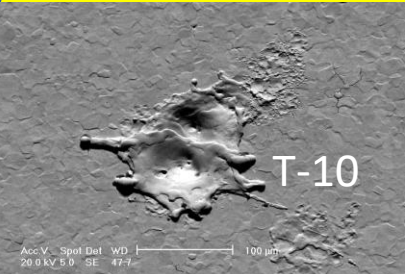


Температура W макета при термоциклировании

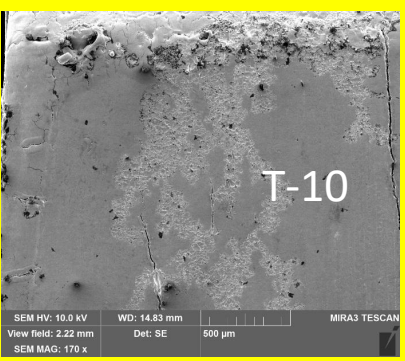


Актуальность испытаний стационарными плазменными потоками и мощными импульсными нагрузками, синергетические эффекты, ожидаемые в реакторе

неисследованные



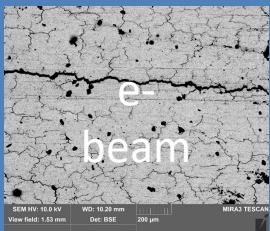
T-10




T-10

Дуговая эрозия


Исследованные




e-beam



КСПУ




T-10

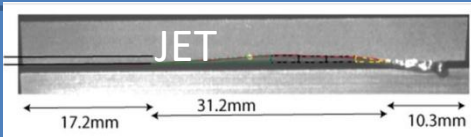


e-beam

рекристаллизация
растрескивание
оплавление
распыление



AUG



JET

17.2mm 31.2mm 10.3mm

неисследованные



ПЛМ



ПЛМ

наноструктурные высокопористые слои

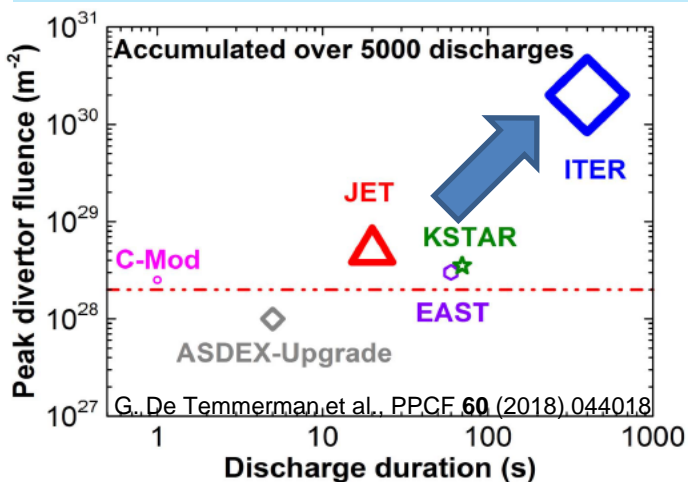
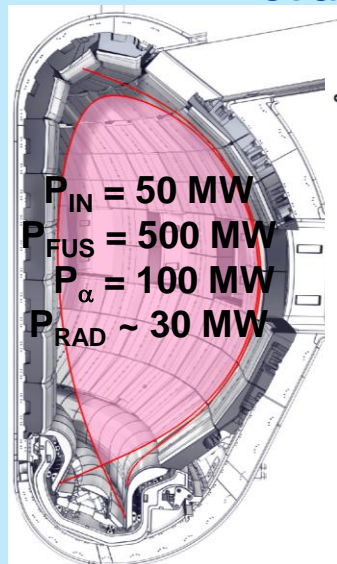
10 нс - 100 мкс

1мс - 10 секунд

100 - 10000 секунд

10 нс - >10000 секунд : термоядерный реактор

Актуальность испытаний комбинированными пучковыми и стационарными плазменными потоками



-High Hest Flux Test испытания обращенных к плазме материалов для достижений условий ожидаемых в реакторе, ИТЭР;

-Рекристаллизация : при $q_{\text{peak,target}} = 15 \text{ MWm}^{-2}$ - твердость W уменьшается на 50%;

-Растрескивание моноблоков

- Взаимодействие плазмы с поверхностью, влияние на периферию;

- Дуговые процессы, экранирование поверхности испаренным материалом при ЭЛМах;

- Рост высокопористых структур (пуха) и накопление газа, трития.

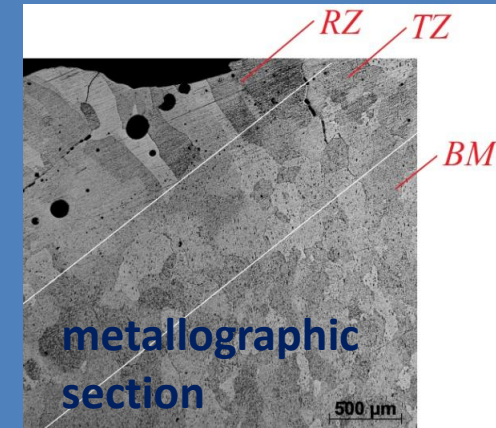
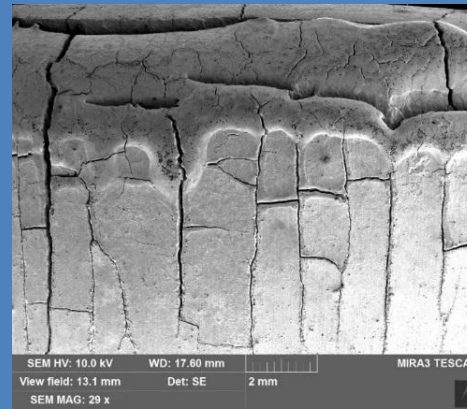


Токамак Т-10, ~1000 разрядов, 1MW ЭЦРН:
 W ITER grade лимитер - растрескивание и оплавление

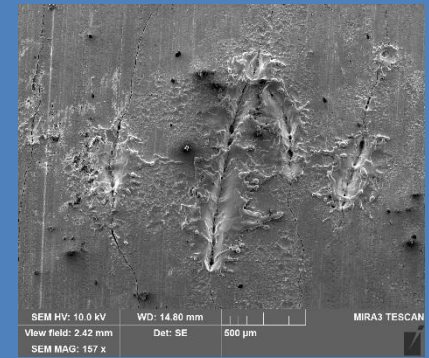
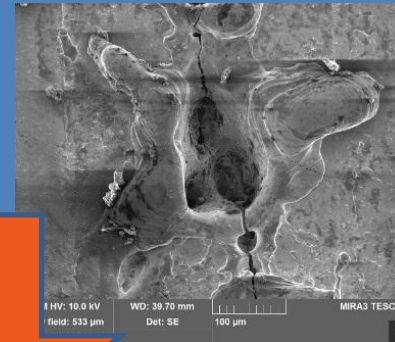
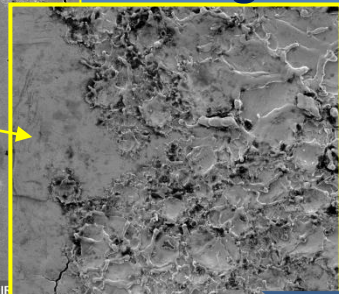
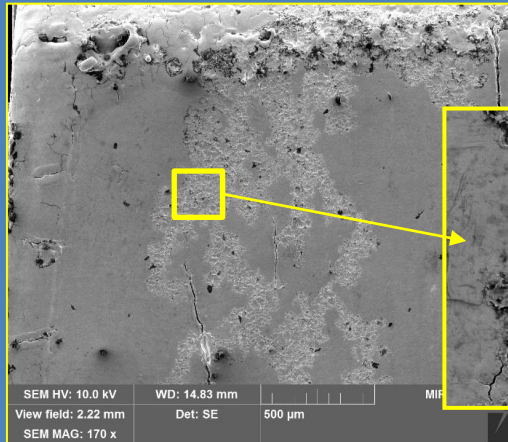
Grashin et al. FED 146 B (2019) 2100
 Будаев и др. ВАЯТ, 2018

V. P. Budaev, Physics of Atomic Nuclei 79 (2016) 1137
 R. Pitts et al., Nuclear Materials and Energy 20 (2019) 100696

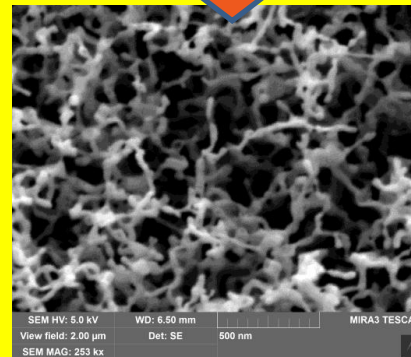
ITER-grade tungsten test in tokamak T-10 and subsequently in PLM



Tokamak T-10, ~1000 shots, 1MW ECRH: cracking and arcs damage



Grashin et al. FED 146 B (2019) 2100



PLM helium plasma test
200 minutes, 0.5-1 MW/m²,
target $t=900$ °C
nanostructured fuzz growth
nanofibers of 20-50 nm