

II Международная научно-практическая конференция  
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»



# Плазменно-пучковые методы модификации материалов

**С.Д. Федорович, В.П. Будаев,  
А.В. Дедов, А.В. Елецкий**

FedorovichSD@mail.ru

Работа поддержана грантами РНФ 17-19-01469, РФФИ 19-29-02020,  
Мегагрантом 14.Z50.31.0042

16-18 сентября 2020 г  
Воронеж, Россия



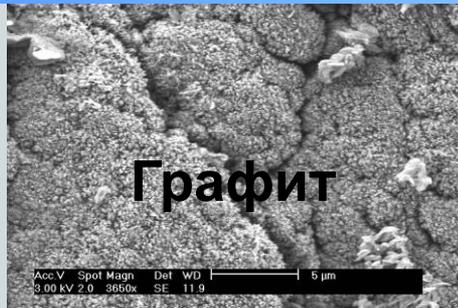
# Введение

На кафедре общей физики и ядерного синтеза национального исследовательского университета «МЭИ» за последние несколько лет разработаны и апробированы технологии создания поверхностей конструкционных материалов с новыми физико-химическими свойствами. Первое направление – использование плазменно-теплового воздействия, второе – улучшение свойств функциональных поверхностей внедрением углеродных наноматериалов при использовании лазерного и электронного облучения.

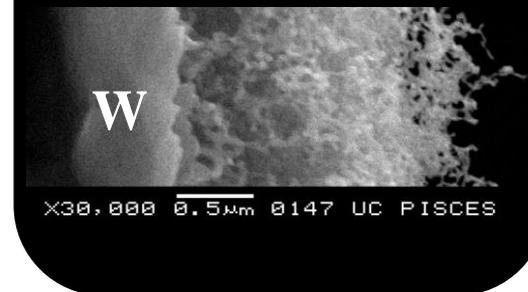
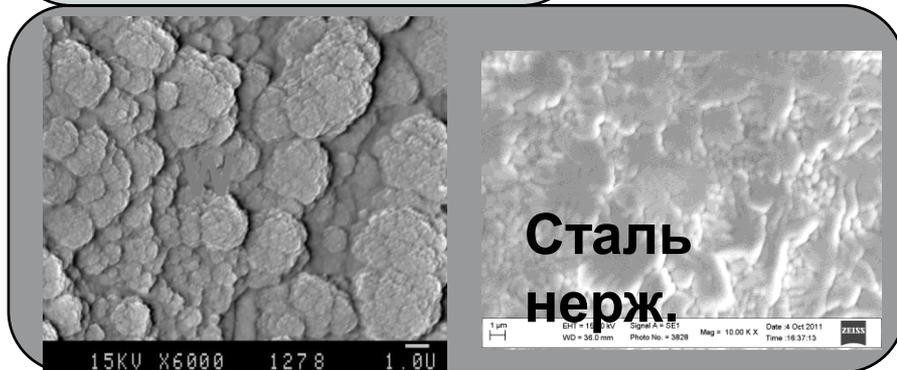
При воздействии на материал экстремальных плазменно-тепловых нагрузок обнаружены эффекты формирования высокопористых наноструктурных материалов нового поколения. Такая структура поверхности твердого тела наблюдается после воздействия плазмы на материалы в условиях сильной неравновесности при одновременном вовлечении множественных механизмов эрозии и переосаждения эродированного материала, плавления, движения и отверждения поверхностных слоев на масштабах от десятков нанометров до сотен микрометров.

Характерным свойством структуры измененной поверхности материалов является стохастическая кластеризация рельефа поверхности: иерархическая гранулярность, негауссова статистика высот рельефа, что определяет новые физико-химические свойства таких материалов и представляет интерес для их использования в различных технологиях: управление турбулентными потоками в плазме и аэродинамике, катализаторы для водородной энергетике, сенсоры, биомедицинские технологии.

# Поверхность после мощного плазменного воздействия: обнаружено явление роста самоподобной стохастической структуры поверхности – фрактального роста начиная от наномасштабов



Твердые материалы с  
новой нано- и  
микроструктурой:  
обладают уникальной  
автомодельной  
симметрией

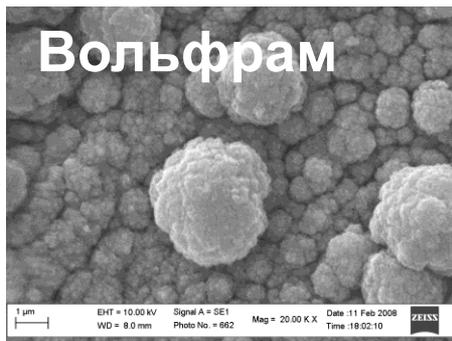


Применение для атомных и термоядерных реакторов, гиперзвуковых ЛА,  
биотехнологий и др.

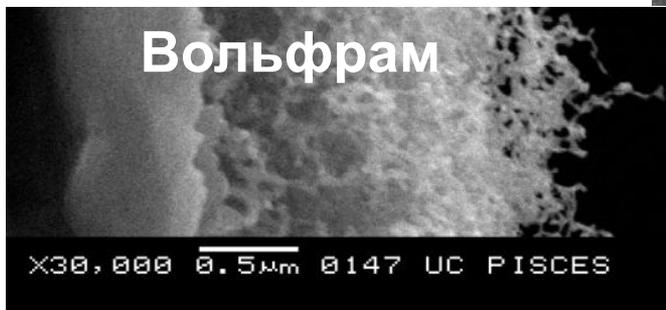
# Поверхность после мощного плазменного воздействия

Материалы нового поколения. Металлические, углеродные, композиты, в т.ч. вольфрам, молибден, бериллий, титан и др.

**Потенциал технологических применения для эксплуатации при экстремальных тепловых и плазменно-пучковых нагрузках, катализаторы, медико-биологические применения**

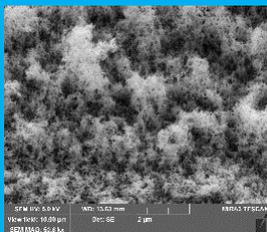


Фрактальный рост материалов, уникальная структура с топологической размерностью  $D=2.3$

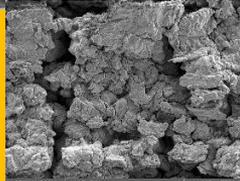


# РАБОТЫ В НИУ «МЭИ» ПО ПЛАЗМЕННЫМ, ПУЧКОВЫМ И ТЕПЛОВЫМ ИСПЫТАНИЯМ МАТЕРИАЛОВ, КОМПОНЕНТОВ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

**ПЛМ плазменная установка**



**Электронно-пучковая установка термо-циклические нагрузки, 1- 320 MWт/м2**



**Тепловые испытания охлаждаемых модулей ИТЭР, КПС, >10-20 MWт/м2**

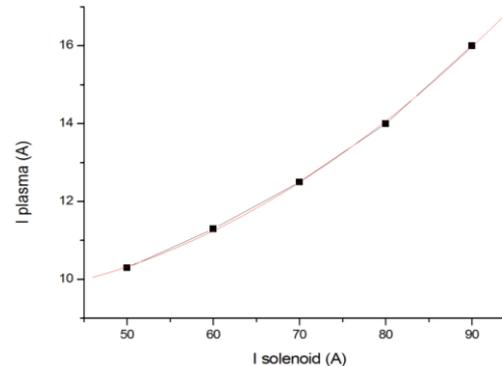


**0.5—2.5 МПа, 1 kg / s, интенсивное водяное охлаждение 15 - 60° С, двухфазными потоками**

# ПЛМ –плазменная ловушка мультикасповая магнитная линейная система, мультикасп 8-польный



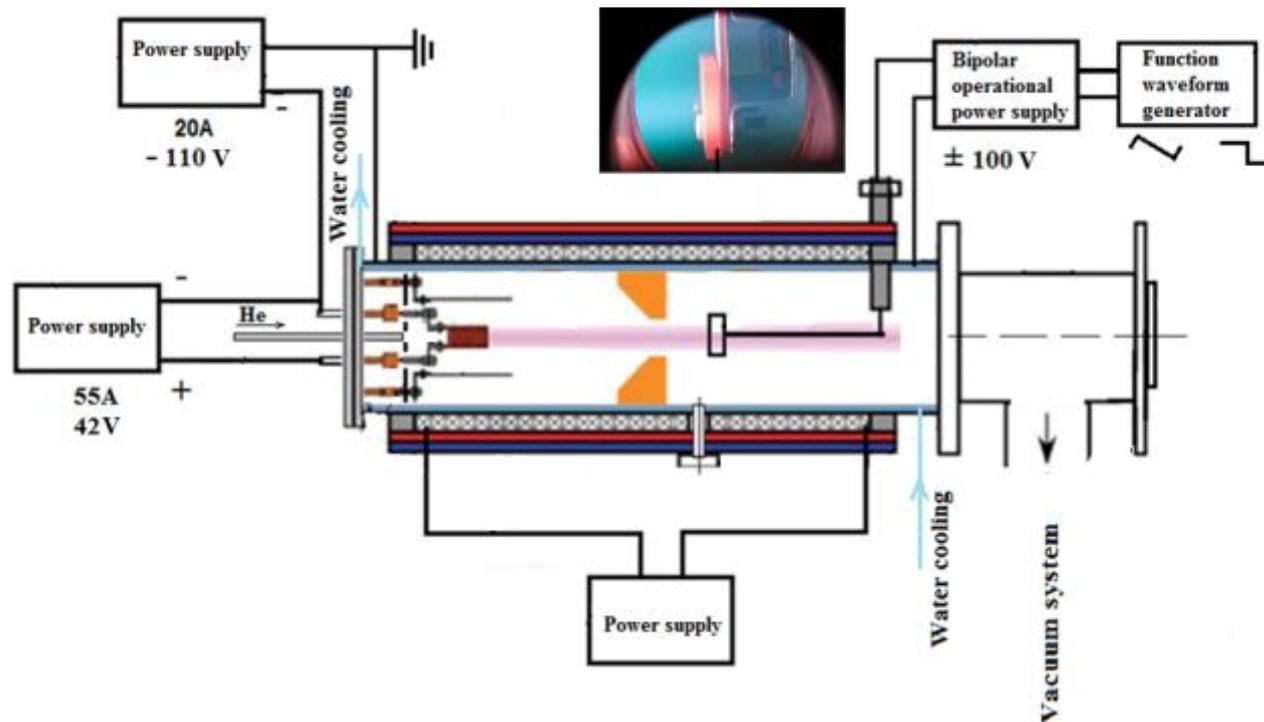
$B=0.01\text{T}-0.2\text{T}$ ,  
 $n_e=5 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ,  
 $T_e = 2-50 \text{ эВ}$   
Рабочий газ – гелий, аргон, дейтерий  
Стационарный разряд - до 200 мин  
Нагрузка на мишени - 1-5 МВт/м<sup>2</sup>.  
Ионный поток - до  $3 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$   
Диаметр\длина камеры – 160\800 мм





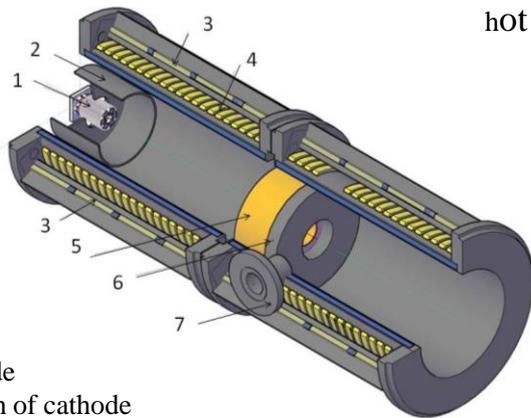
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Методика эксперимента



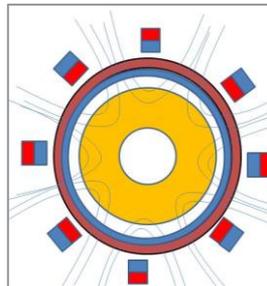
# ПЛМ –плазменная ловушка мультикасповая вакуумная камера и магнитная система

water cooling chamber diameter/length 0.18m/0.72 m  
hot plasma column – 3.5 cm

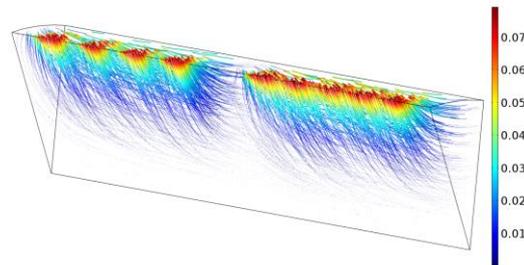
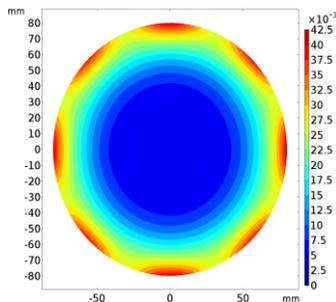


- 1- tantalum cathode
- 2- tantalum screen of cathode
- 3 – permanent Nd magnets
- 4 – solenoid windings
- 5 - copper anode
- 6 - steel ring
- 7 – optical window

**8-pole multi-cusp magnetic field**



permanent Nd magnets



3D topology of magnetic field lines near the cusp  
Budaev et al Magnetohydrodynamics, 2019, 55, 31



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

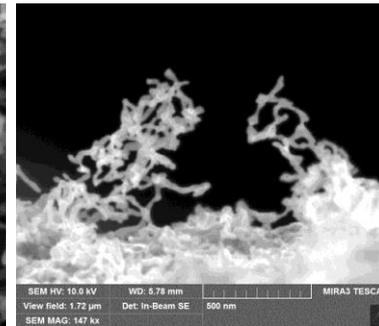
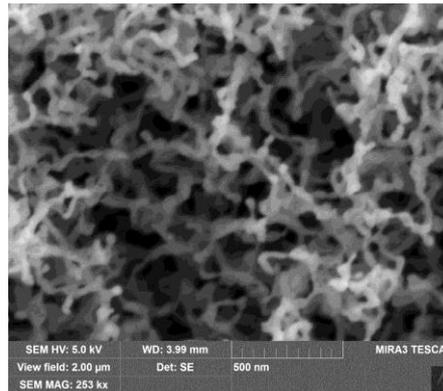
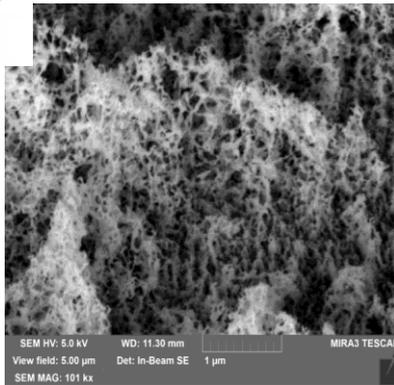
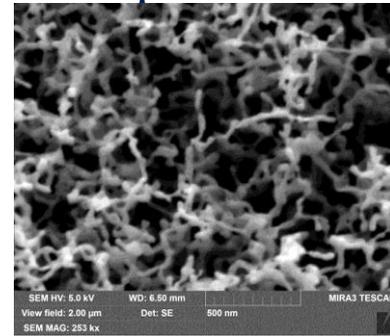
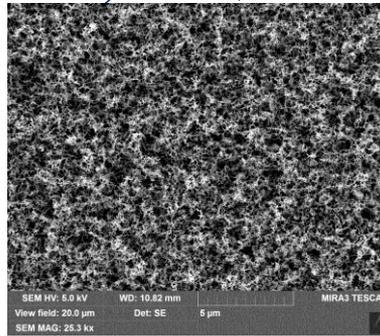
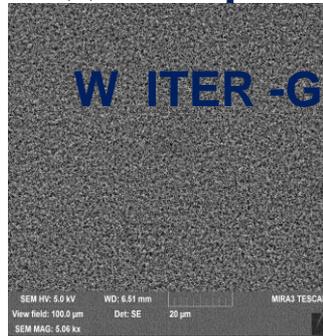
# Результаты и обсуждение

В ПЛМ – 200 минут, T=930 °C, гелиевая плазма

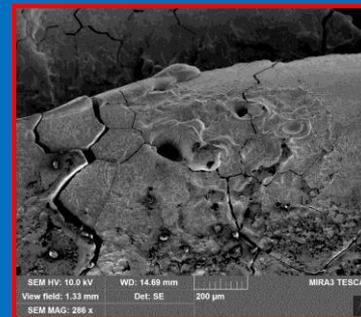
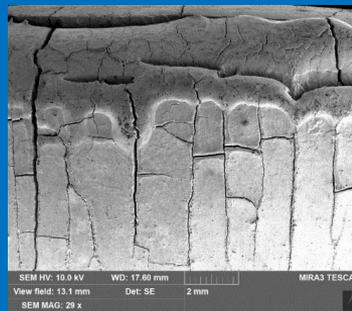
Рост наноструктурного пуха “fuzz”–W,

диаметр~ 20-50 nm, толщина слоя ~1.5 μm

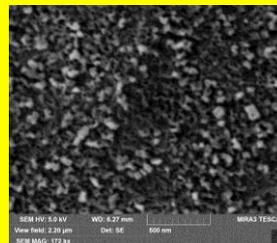
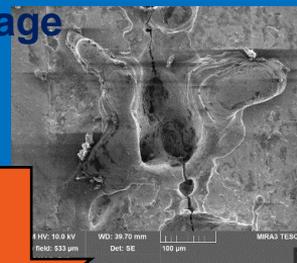
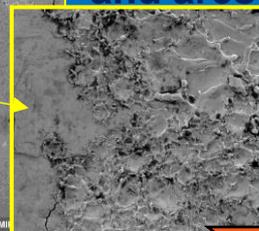
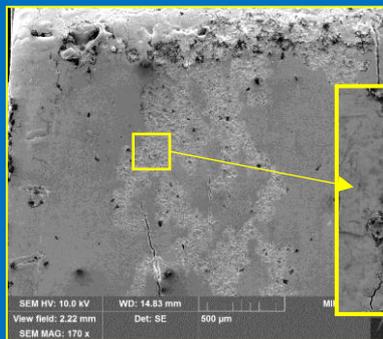
ITER-grade



# Рост наноструктурного пуха на W ITER-grade из токамака T-10



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

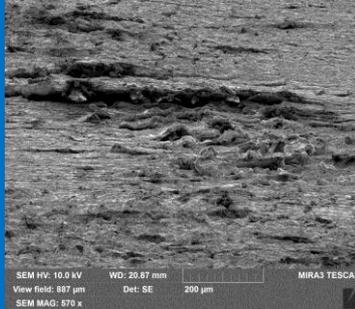


**PLM helium plasma test  
200 minutes, 0.5-1 MW/m<sup>2</sup>,  
target t=900 °C  
nanostructured fuzz growth  
nanofibers of 20-50 nm**

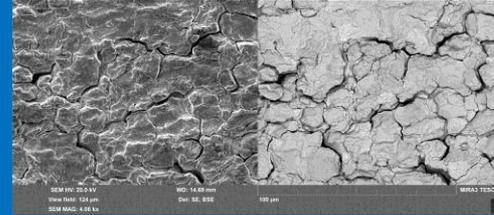
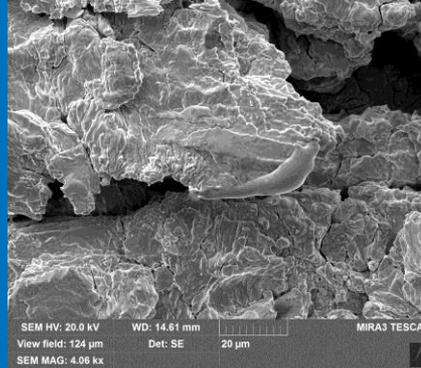
# Рост пуха на поверхности W- ITER-grade VM-P

после мощного электронного пучка

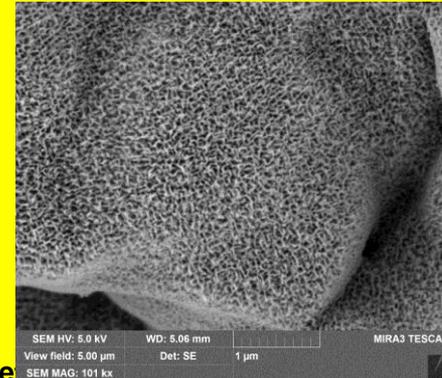
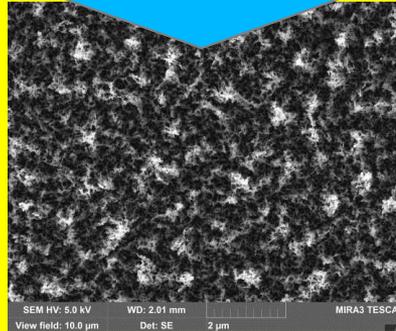
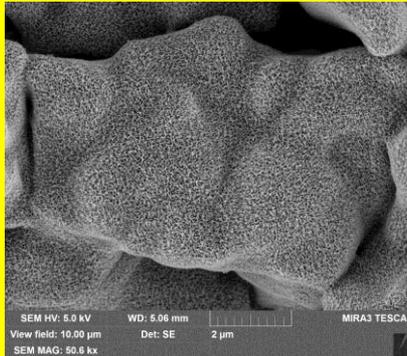
E-beam facility, 60 kV, power 60 kW, power load - 40 MW/m<sup>2</sup>



ITER-grade W VM-P

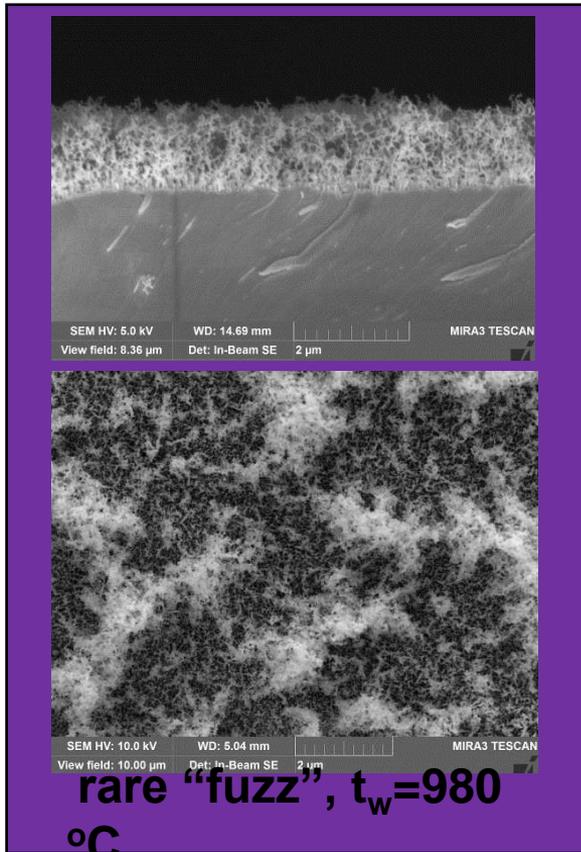


ПЛМ



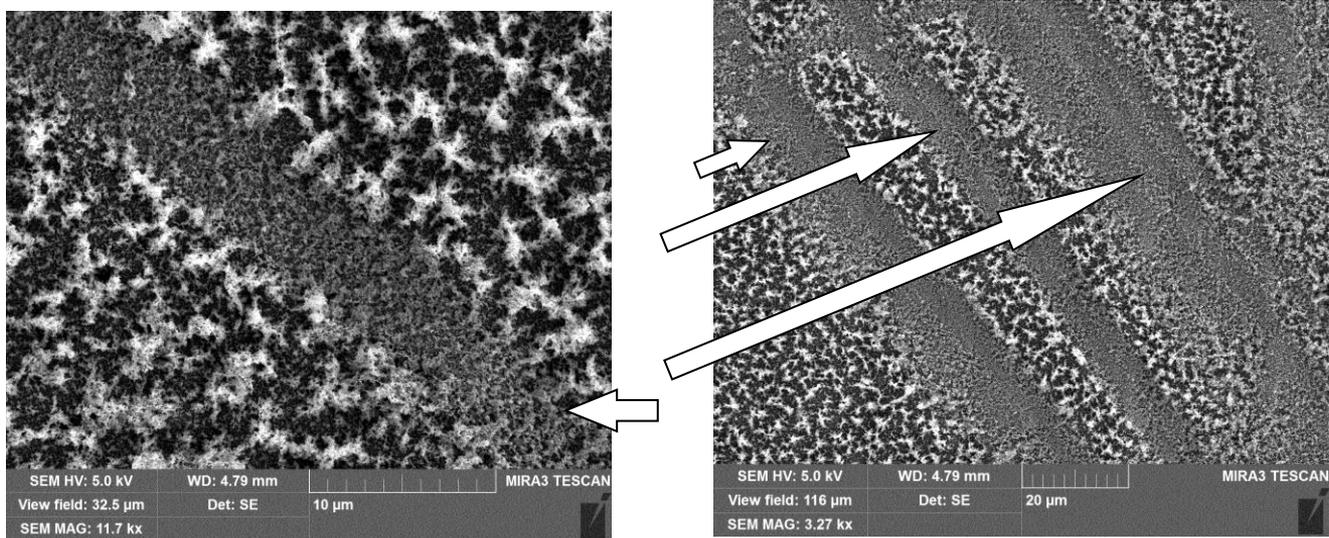
PLM helium plasma irradiation, 200 minutes, 0.5-1 MW/m<sup>2</sup>, target growth on corrugated roughen surface, nanofibers of 20-50 nm

# «Редкий» и «плотный» пух на вольфраме гелиевый разряд в ПЛМ



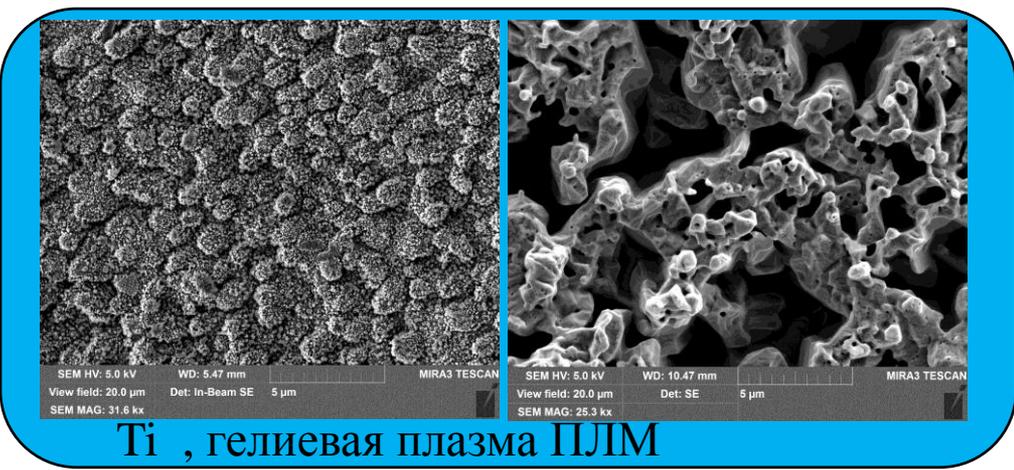
ПЛМ ~100 минут толщина пуха ~ 1.6  $\mu\text{m}$

## Стойкость пуха W к механическим нагрузкам

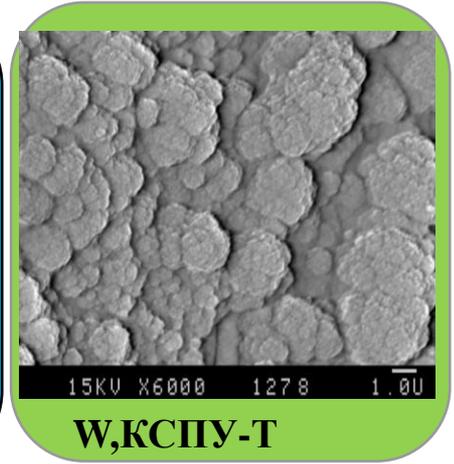


*Вольфрам ВМП- IG с наноструктурированным пухом после механического испытания поверхности соскобом - полосы механического воздействия указаны стрелками*

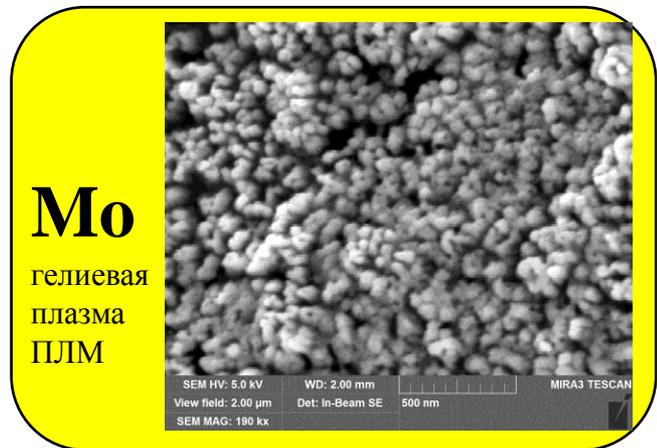
# Универсальность роста нано-микроструктурных высокопористых поверхностей W, Mo, Ti, Ni, Fe



Ti, гелиевая плазма ПЛМ



W, КПУ-Т



Mo  
гелиевая  
плазма  
ПЛМ



Углеродные  
переосажденные слои,

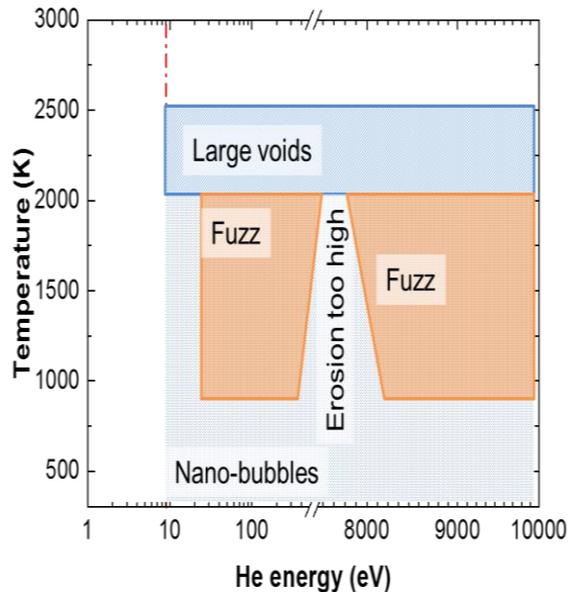
ТокамакТ-10Будаев, Письма в ЖЭТФ, 2017

# Условия роста «пуха» (fuzz)

- $E_{ion} > 20 - 50 \text{ eV}$
- $T_{surf} > 900\text{K}$
- флюенс  $\sim 10^{24} \text{ m}^{-2}$

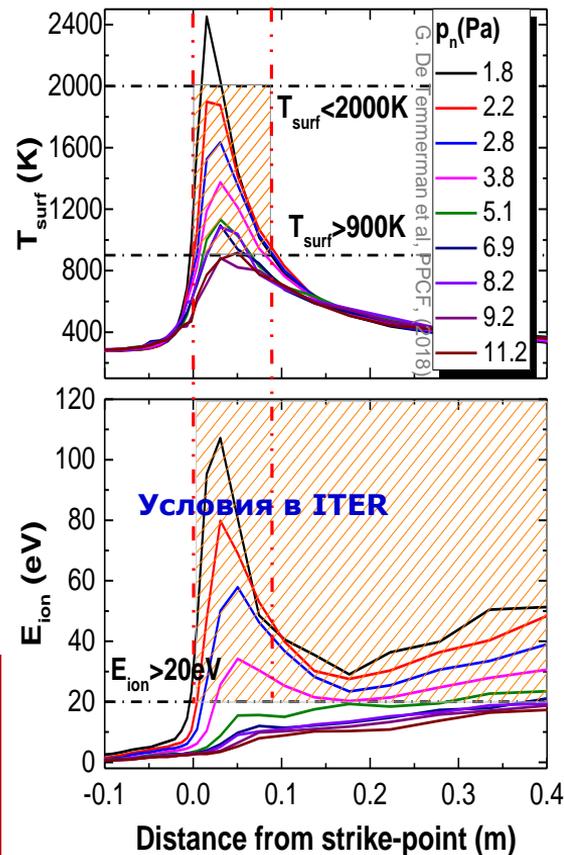
W, Mo, Ti, Ta, Pt, Ni, Fe

Модель  
Мартыненко Ю.В.  
ФП 2012



G. De Temmerman et al, PPCF, (2018)

**Компьютерная программа SOLPS, используемая для расчетов плазменных параметров в периферии плазмы токамака, позволила сделать вывод: «пух» (fuzz) может формироваться в узком слое в диверторе (~1.6-3.6m<sup>2</sup>).**



Kajita e a. Sci. Rep, 2015

# Установка ПЛМ-2 для полномасштабных плазменно-пучковых испытаний материалов гибридного термоядерного реактора

Плазменная установка ПЛМ-2 не имеет аналогов в России, будет в ряду самых мощных уникальных установок в мире (MAGNUM-PSI ЕС, MPEX США); сооружается на базе имеющейся установки ПЛМ. Новые цели: полномасштабные испытания материалов гибридного термоядерного реактора: W, Mo, сталь и др. , жидкометаллические (литий, олово и др.) компоненты стенки; создание новых наноструктурированных материалов

Испытание материалов термоядерного реактора  
Создание наноструктурированных пористых материалов

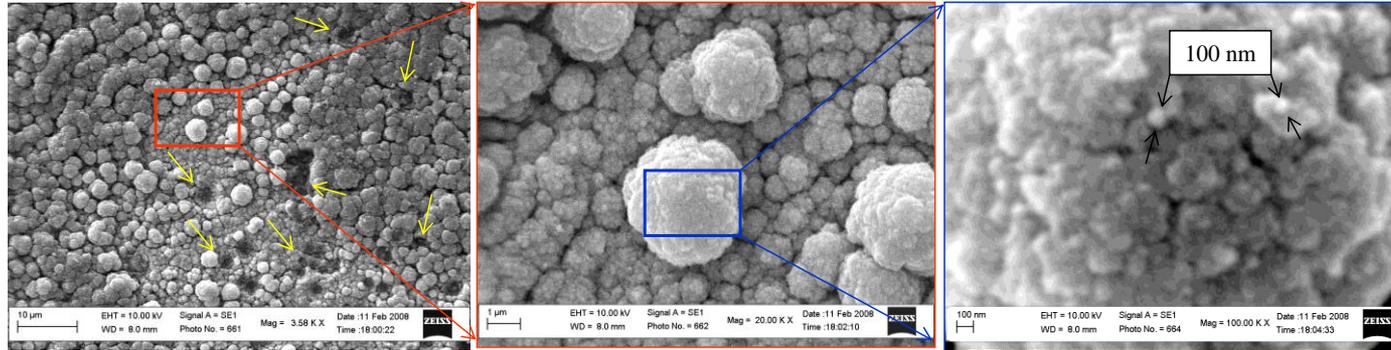
Технологии плазменного космического двигателя мощностью более 100 кВт  
Технологии плазменного упрочнения лопаток турбин

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



Повышенная удельная сорбционная поверхность

Плазменный ускоритель КСПУ, W, 1.5 МДж/м<sup>2</sup>, 1 мс

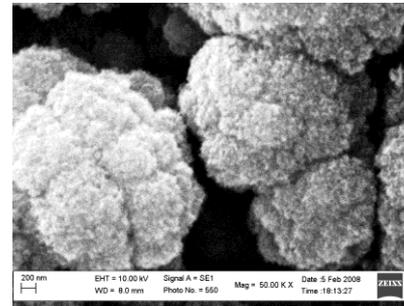


10 мкм

1 мкм

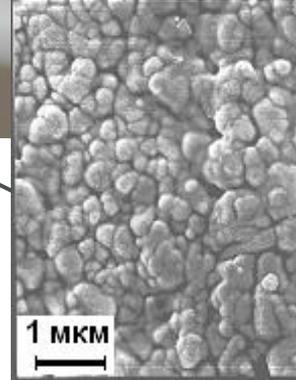
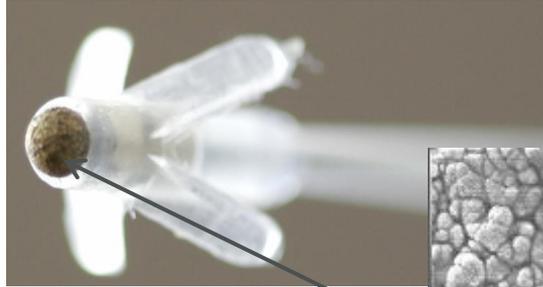
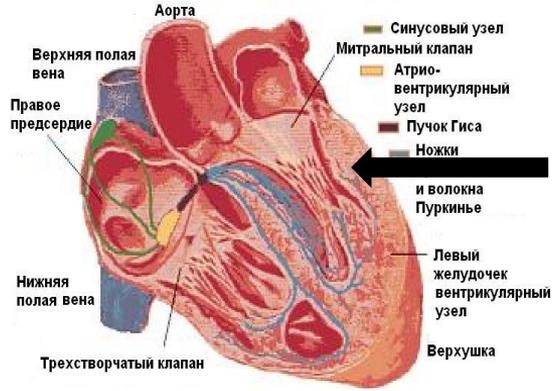
200 нм

- сферические кластеры, состоящие из более мелких кластеров ~ **0.02 ÷ 2 μm**
- топология иерархической гранулярности агломератов W, Be, C **одинакова**
- **Фрактальная размерность структуры 2.2**



200 нм

# Применение в медицине – биосовместимая шероховатость фрактальной поверхности



19

**Современные кардиостимуляторы , нейростимуляторы, протезы.**

**Требуется биосовместимая фрактальная структура с шероховатостью от нанометровых масштабов**

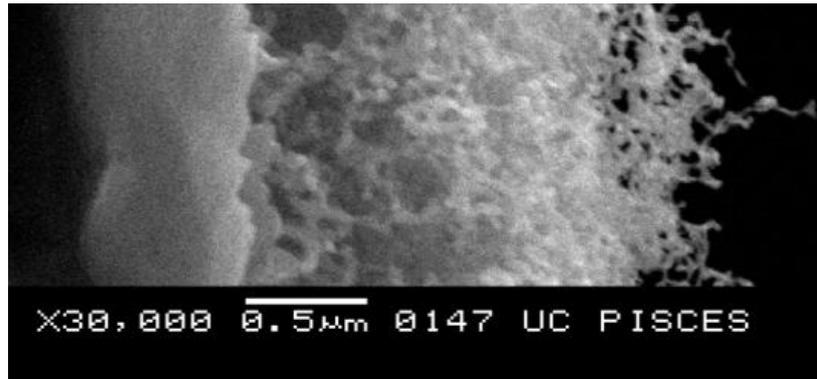
Yu V Martynenko and V P Budaev. [Plasma technology for surface processing of the ruthenium pacemaker electrodes](#) Journal of Physics: Conference Series 1383 , 012027 (2019 )

Мартыненко Ю.В., Будаев В.П. [Плазменная технология формирования поверхности электродов кардиостимуляторов из рутения](#) Вестник МЭИ № 6. С. 64—70 (2019 г.)

# Пористые катализаторы

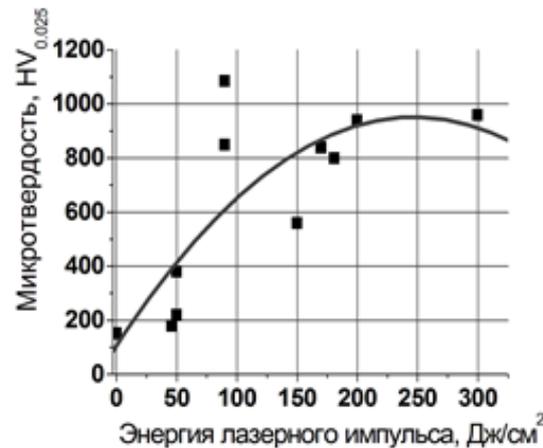
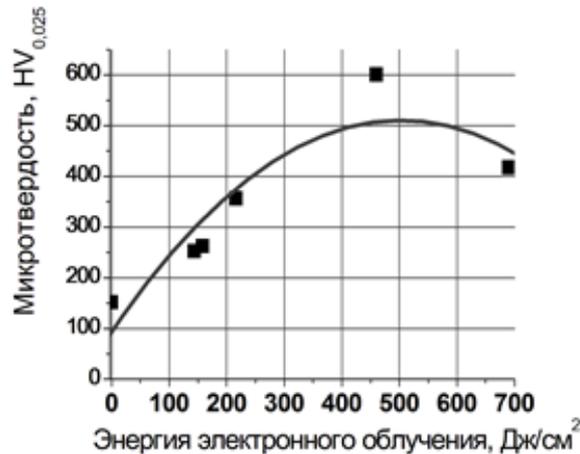
Новые высокопористые W катализаторы разложения воды на кислород и водород

Высококочувствительные датчики горючих газов, диоксида азота и др.



# Модифицирование поверхности в результате нанесения нанокуглеродного покрытия

Нанокуглеродные структуры хорошо себя зарекомендовали в качестве упрочняющего покрытия стальной поверхности. В качестве нанокуглеродного материала использовалась сажа, образованная в результате электродугового распыления графитовых электродов с последующей экстракцией фуллеренов, фуллерен C<sub>60</sub>, а также термически восстановленный оксид графена с различной степенью восстановления. Эксперименты продемонстрировали эффект многократного увеличения микротвердости поверхности малоуглеродистой стали в результате нанесения нанокуглеродного покрытия с последующей обработкой интенсивным лазерным или электронным облучением.



# Выводы

1. При испытаниях вольфрама, графита, стали, титана, тантала в плазме термоядерных установок с экстремальными импульсными нагрузками до  $2 \text{ МДж/м}^2$  обнаружена неоднородная стохастическая кластеризация поверхности со свойствами самоподобия структуры гранулярности от наномасштабов до макромасштабов. Такая кластеризация качественно отличается от простейшей шероховатости типа броуновской поверхности.
2. Тугоплавкие металлы с подобным стохастическим рельефом востребованы в плазменных, гиперзвуковых, электрохимических, биомедицинских технологиях.
3. Для снижения сопротивления и тепловой нагрузки на обтекаемые поверхности при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях предлагается использовать покрытие летательных аппаратов материалами с высокопористой структурой, полученной в плазменных установках.
4. В биомедицинских применениях предлагается использовать электроды кардиостимуляторов с шероховатой поверхностью, полученной при обработке высокотемпературной плазмой.
5. Установлен экспериментально эффект упрочнения стальной поверхности при нанесении нанокремнистого материала с последующей обработкой высокоинтенсивными пучками частиц. Измерения показывают немонотонную зависимость степени упрочнения от интенсивности пучка. То есть результаты экспериментов указывают на возможность оптимизации наблюдаемого эффекта.

# Перспективы технологического применения высокопористых материалов, полученных после обработки плазмой, и упрочнения поверхности пучками частиц

1. Budaev V. P. Stochastic clustering of material surface under high-heat plasma load Physics Letters A 381 (2017) 3706–3713 (2017.)
2. S D Fedorovich , V P Budaev , Yu V Martynenko , A V Karpov , M K Gubkin , E V Sviridov , K A Rogozin and Z A Zakletsky. Formation of titanium highly porous nanostructured surface under plasma irradiation in the PLM device Journal of Physics: Conference Series 1370 012045 (2019 )
3. Budaev V.P. Innovative potential of plasma technology Journal of Physics: Conference Series 891 012301 (2017 )
4. Budaev V.P. Innovative trends in development of plasma technologies Journal of Physics: Conference Series 1094 (2018) 012016 pages 1-6 (2018)
5. V P Budaev, S D Fedorovich, Yu V Martynenko, A V Karpov, M V Lukashevsky, A V Lazukin, M K Gubkin, D N Gerasimov, E A Shestakov, E V Sviridov, A Yu Marchenkov, K A Rogozin, D S Gvozdevskaya and Z A Zakletskii. Stochastic nanostructure and fuzz-like structure formation on the material surface under powerful plasma load in the PLM device Journal of Physics: Conference Series (2019 )
6. V P Budaev, A V Dedov, A T Komov, S D Fedorovich and Z A Zakletskii. The PLM-2 plasma device for full-scale tests of fusion reactor materials with stationary plasma loads: design parameters Journal of Physics: Conference Series 1383 012016 (2019 )
7. V P Budaev, S D Fedorovich, Yu V Martynenko, A V Karpov, D N Gerasimov, G van Oost, M V Lukashevsky, A V Lazukin, M K Gubkin, A P Sliva, E A Shestakov, E V Sviridov, A I Marchenkov e a. Study of the stochastic clustering on the refractory material surface under the effect of plasma load in the PLM device Journal of Physics: Conference Series 1383 , 012015 (2019 )
8. Мартыненко Ю.В., Будаев В.П. Плазменная технология формирования поверхности электродов кардиостимуляторов из рутения Вестник МЭИ № 6. С. 64—70 (2019 г.) Martynenko Yu.V., Budaev V.P. The Plasma Technology for Shaping the Electric Pacemaker Electrode Surfaces Coated with Ruthenium. Bulletin of MPEI. 2019;6:64—70. (in Russian).
9. Yu V Martynenko and V P Budaev. Plasma technology for surface processing of the ruthenium pacemaker electrodes Journal of Physics: Conference Series 1383 , 012027 (2019 )
10. Г.С. Бочаров, А.В. Елецкий, О.С. Зилова, Е. В. Терентьев, С.Д. Федорович, О.В. Чудина, Г.Н. Чурилов. Исследование механизма поверхностного упрочнения сталей нанокремнеземными материалами с использованием лазерного нагрева / Физика металлов и металловедение 119 (2) с. 197–201 (2018)
11. I.A. Khaziev, A.V. Dedov and S.D. Fedorovich Research wetting and Leidenfrost effects on structured surfaces in contact with water Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012021 doi :10.1088/1742-6596/891/1/012021



**Спасибо за внимание**