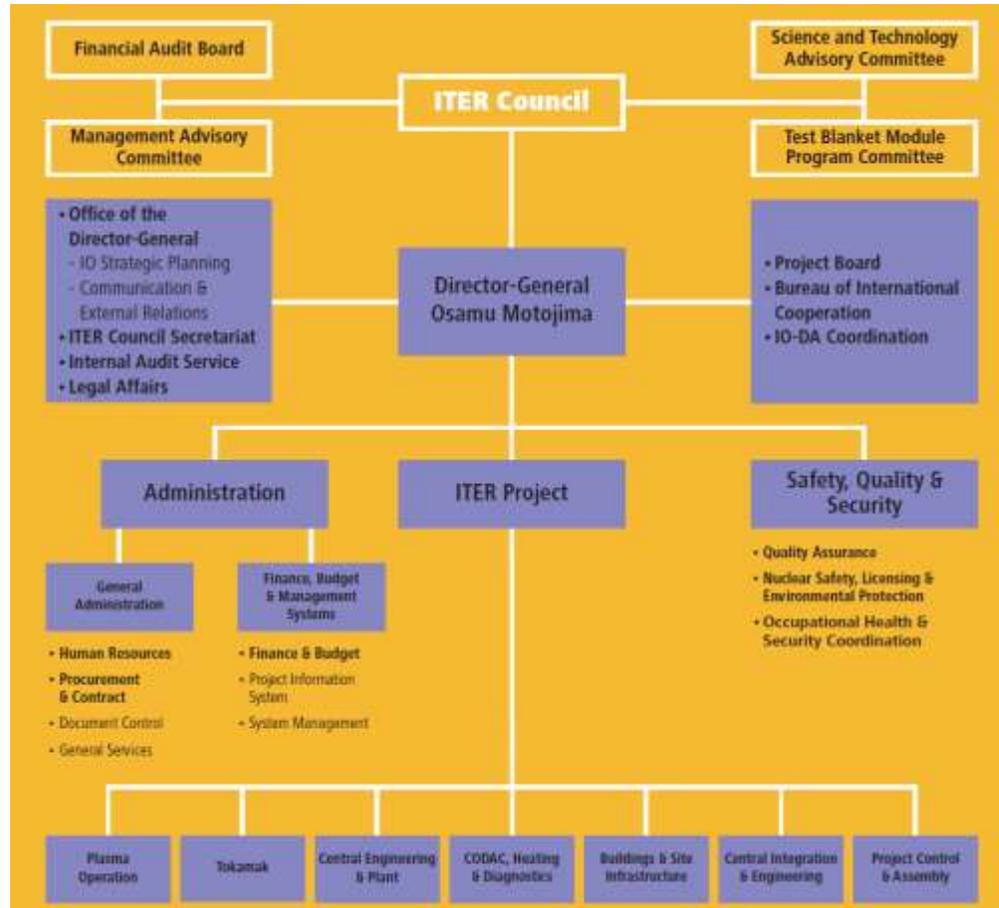


Взаимодействие плазмы  
с материалами  
в термоядерном реакторе

Лектор: Аракчеев А.С.

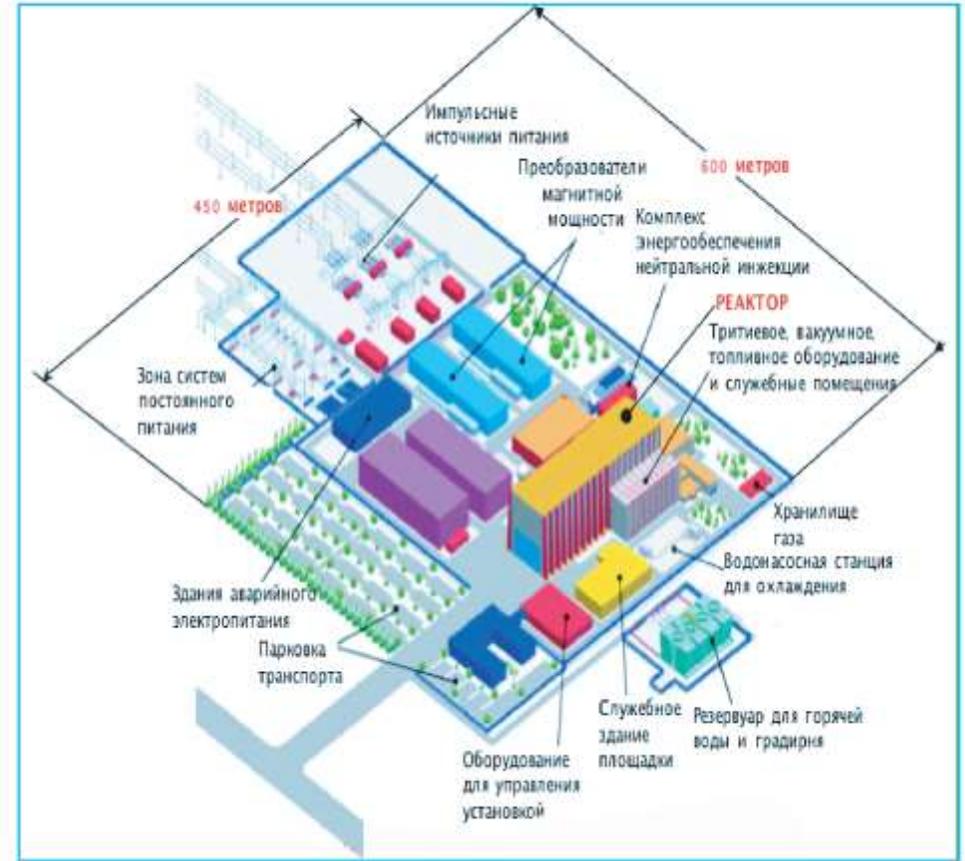
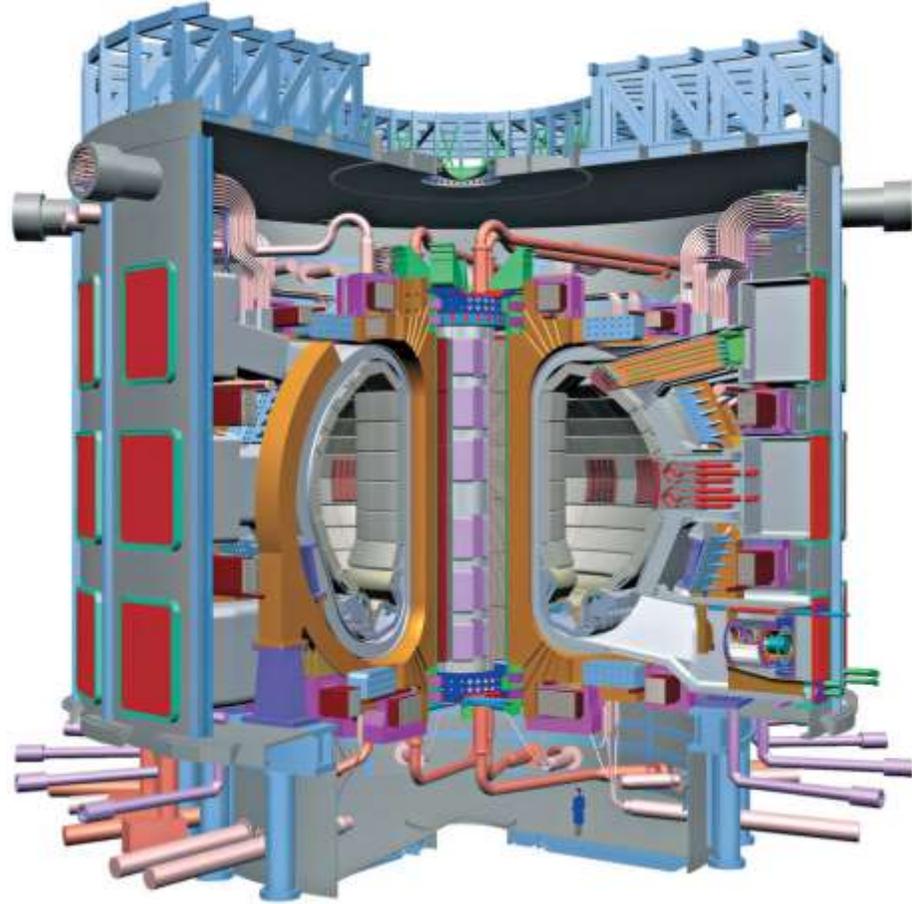
# ITER organization



Бонусы для ИЯФа:

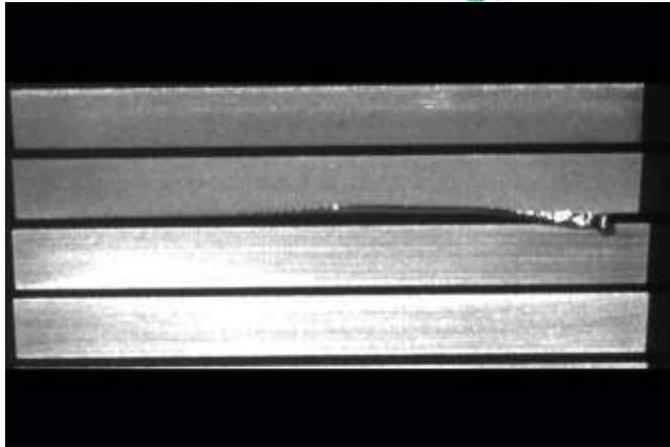
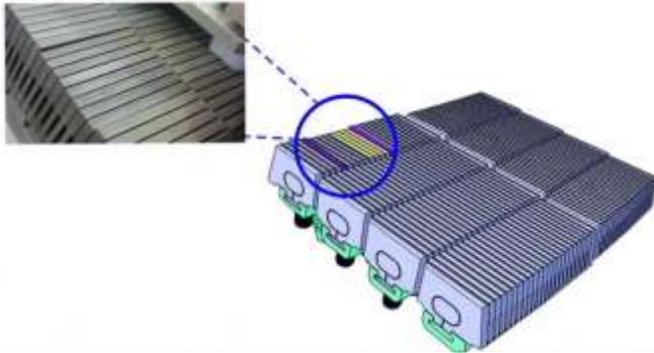
- Деньги за выполнение контрактов
- В ИЯФе остаются технологии и опыт
- Доступ к документам ITER
- Статус

# ITER



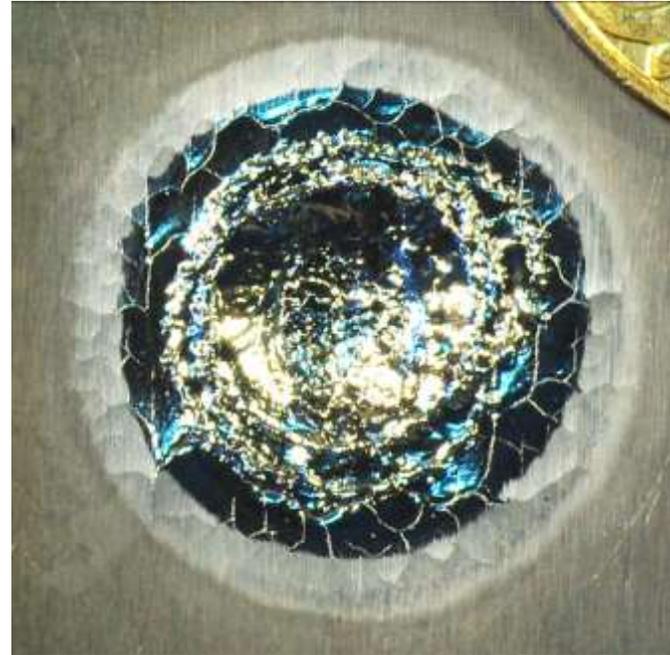
# Масштаб нагрузки

Дивертор JET:



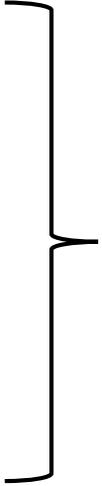
ITER (стационарный режим)  $\sim 5-20 \text{ МВт/м}^2$ , 450 с  
ELMs I type  $\sim 5 \text{ МДж/м}^2$ , 100-1000 мкс,  $200-500 \text{ МДж/м}^2\text{с}^{1/2}$   
ИТЭР (срыв)  $\sim 25 \text{ МДж/м}^2$ , 1-3 мс,  $500 \text{ МДж/м}^2\text{с}^{1/2}$

Результат воздействия  $200 \text{ МДж/м}^2\text{с}^{1/2}$ :



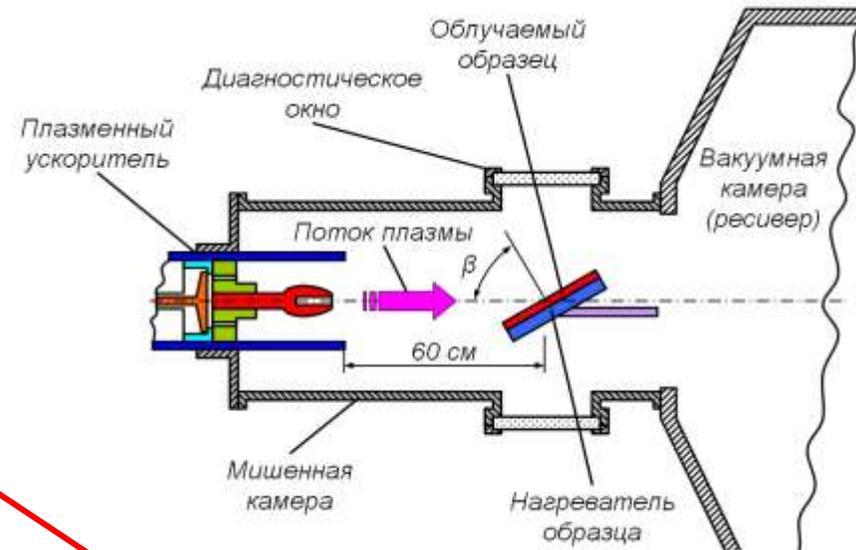
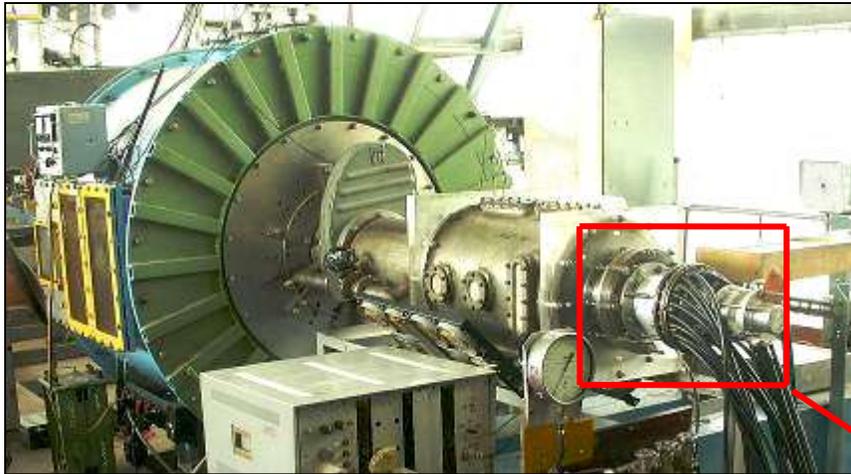
# Воздействия на стенку

- Распыление
- Насыщение примесями
- Хрупкое разрушение
  - Образование и разлёт пыли
  - Образование трещин
- Плавление и растекание
- Кипение и разбрызгивание
- Нейтронное облучение



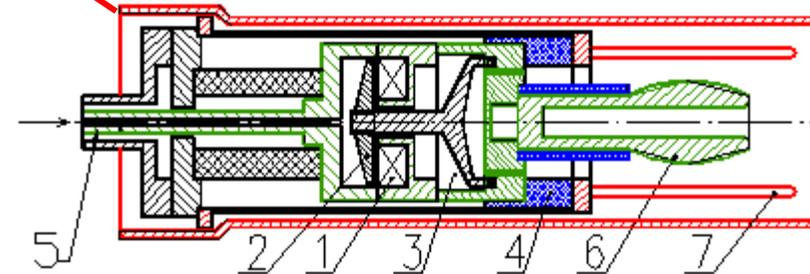
Результат мощной тепловой нагрузки

# КСПУ (Троицк)



## Параметры плазмы КСПУ:

- **Тепловые нагрузки** 0.2 – 5 МДж/м<sup>2</sup>
- **Продолжительность** 0.1 – 0.6 мс
- **Диаметр потока** 5 см
- **Магнитное поле** 0 Т
- **Энергия ионов** 0.1 – 0.5 кэВ
- **Температура e<sup>-</sup>** < 10 эВ
- **Плотность плазмы** 10<sup>22</sup> - 10<sup>23</sup> м<sup>-3</sup>
- **Скорость потока** 50-300 км/с



1 – катушка импульсного газового клапана; 2 – тарелка клапана; 3 – объем над клапаном; 4 – изолятор; 5 – подача газа; 6 – катод; 7 – анод.

# Паровое экранирование

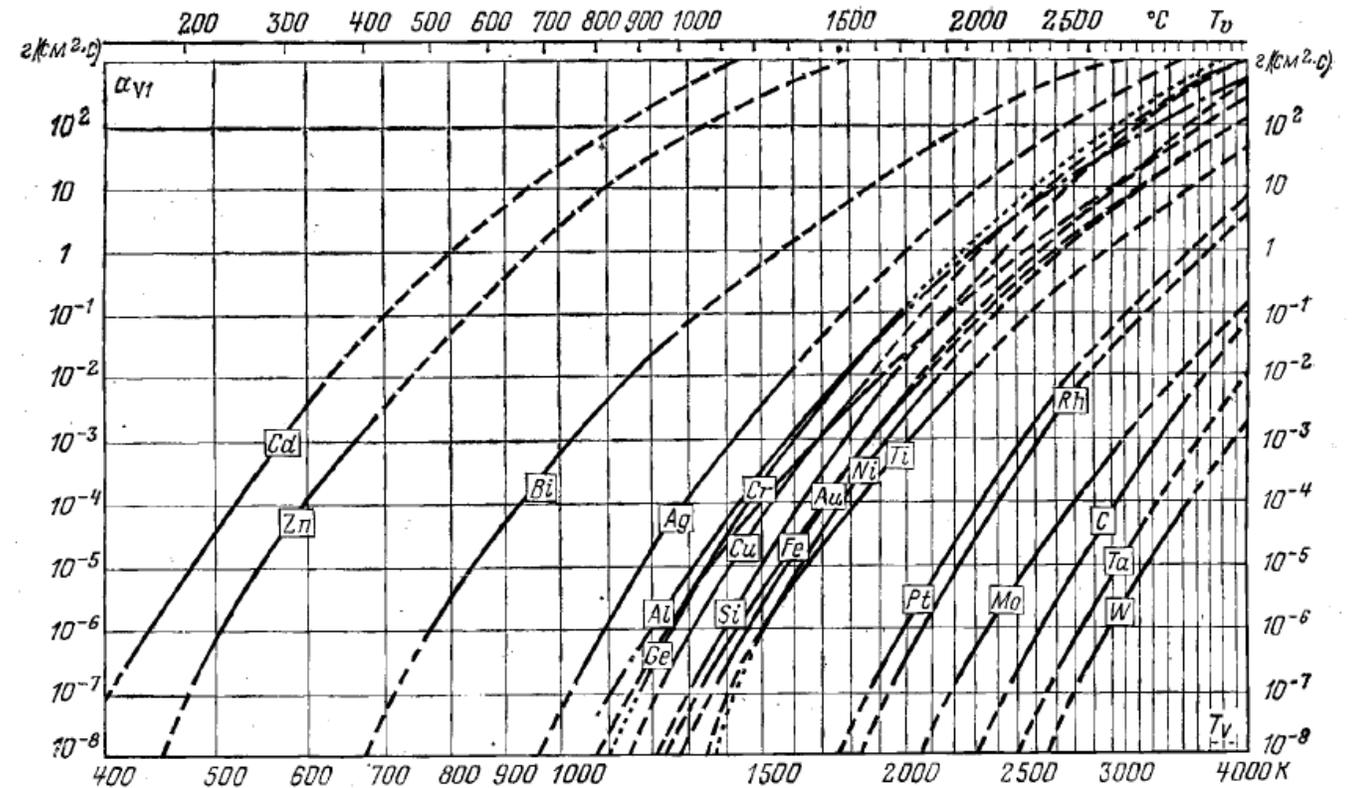
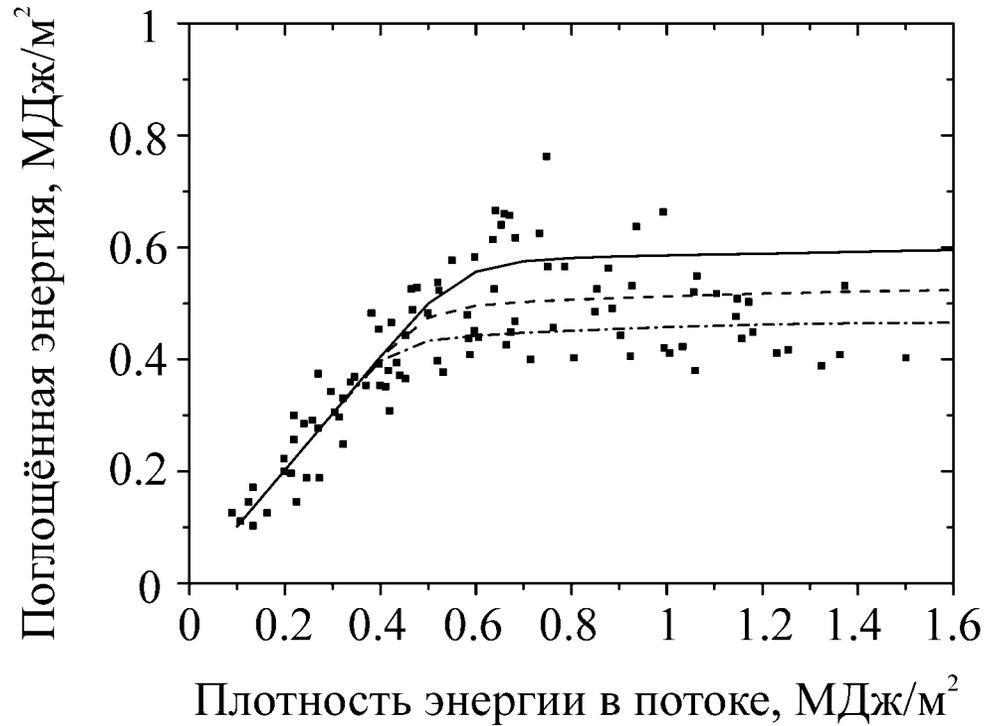
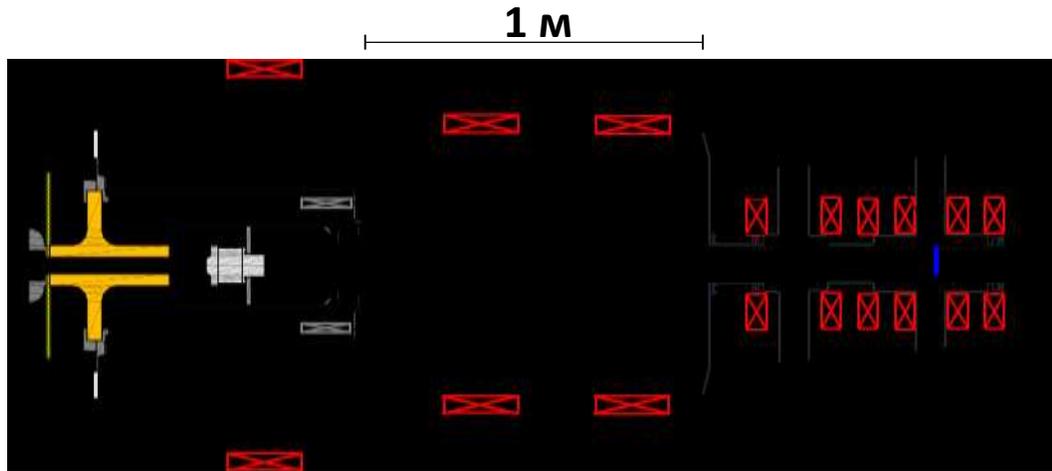


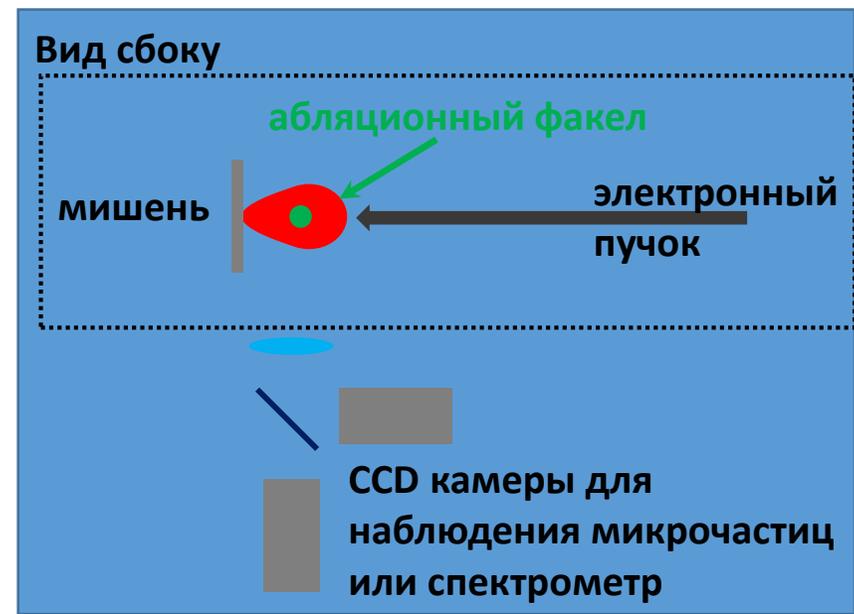
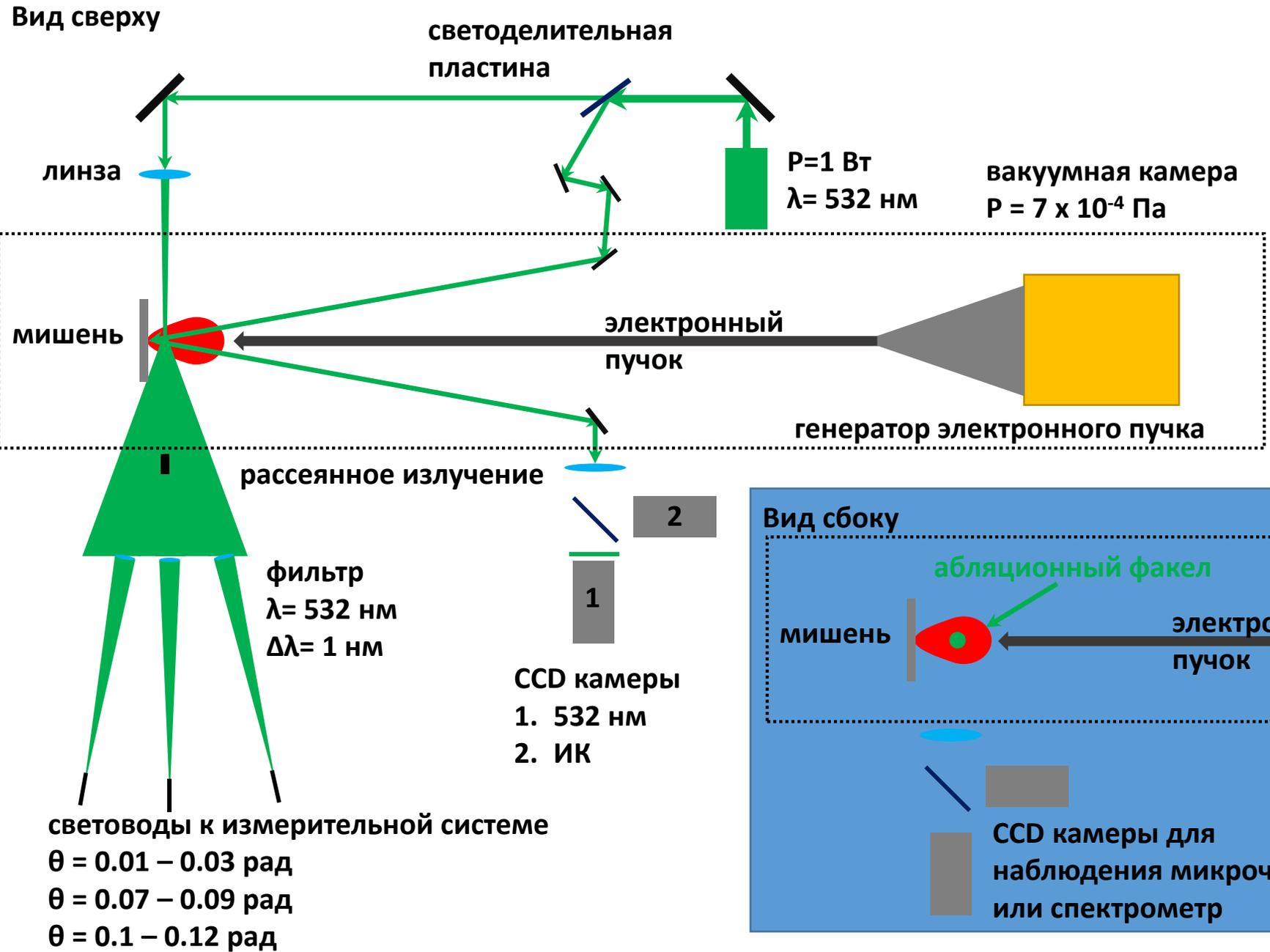
Рис. 3.5. Удельная скорость испарения  $\alpha_{\nu 1}$  некоторых элементов в интервале температур от 400 до 4000 К [3.5. 3.43].

Материал может за фиксированное время поглотить ограниченное количество энергии. Остальное переизлучается в газовом облаке.

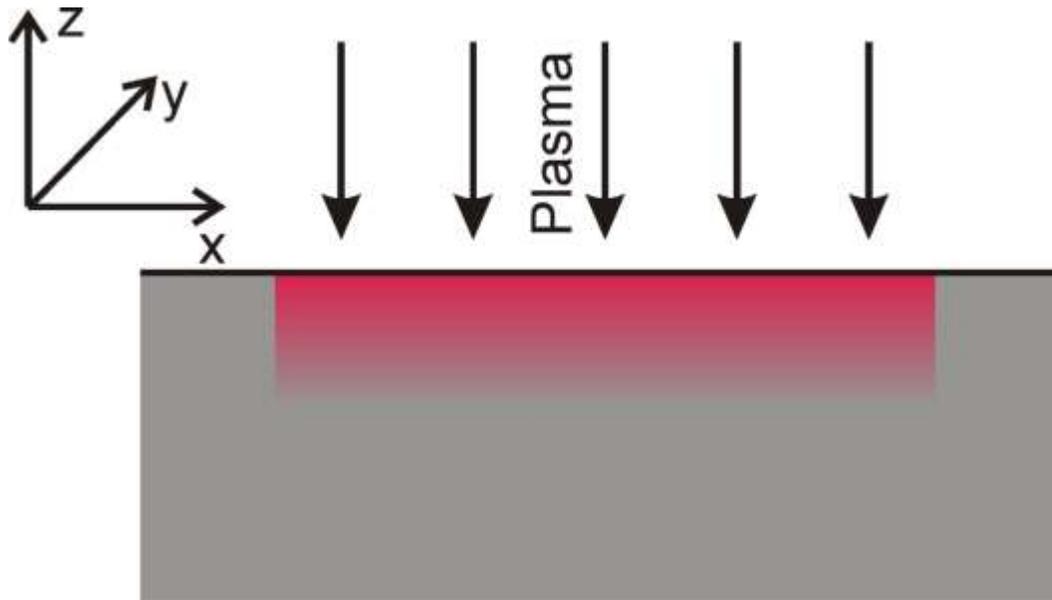
# Стенд для испытания материалов «Зелёная бочка»



- Электронный пучок с компрессией магнитном поле:
  - $t = 100 - 300$  мкс
  - $I = 10 - 50$  А
  - $U = 55 - 85$  кВ
  - $F_{HF} \approx 100-300$  МДж  $m^{-2}s^{-1/2}$
- Куча диагностик



# Упругие деформации материала



- Смещения:

$$u_x^e = u_y^e = 0, \quad u_z^e = \int \frac{1-\sigma}{1+\sigma} \alpha (T(z) - T_0),$$

- Напряжения:

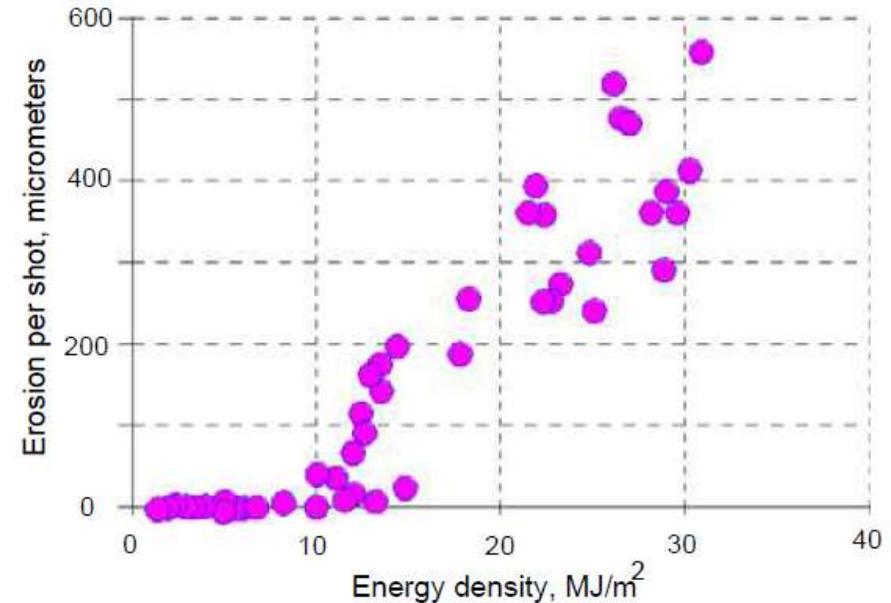
$$\sigma_{zz}^e = \sigma_{xy}^e = \sigma_{xz}^e = \sigma_{yz}^e = 0,$$

$$\sigma_{xx}^e = \sigma_{yy}^e = -\frac{\alpha E (T(z) - T_0)}{(1-\nu)},$$

$T$  – температура,  $T_0$  – начальная температура,  
 $\alpha$  – коэффициент Пуассона,  $\sigma$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль Юнга.

# Облучение графита

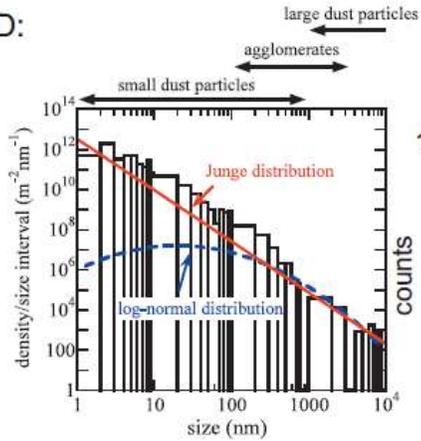
- Особенности графита:
  - Графит не имеет жидкой фазы
  - Хрупкий материал (нет остаточной пластической деформации)
- При нагреве возникают только сжимающие напряжения
- При превышении некоторого порога объёмного выделения мощности графит рассыпается в ПЫЛЬ



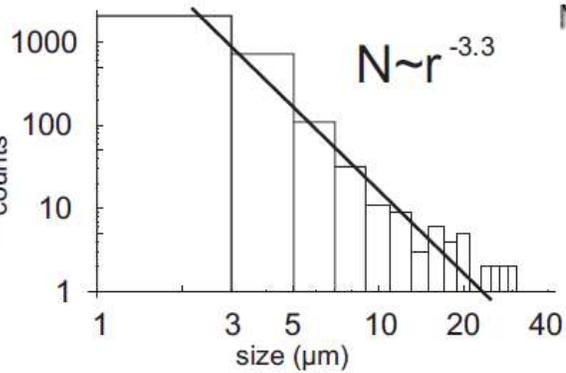
*Fig.1 The erosion depth of the graphite vs energy density*

# Распределение пыли по размеру

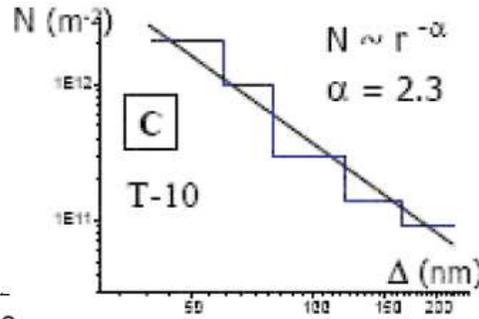
LHD:



GOL-3:



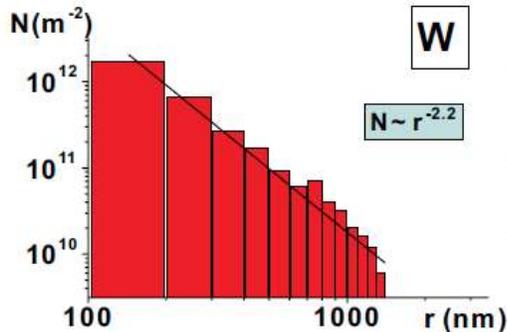
T-10:



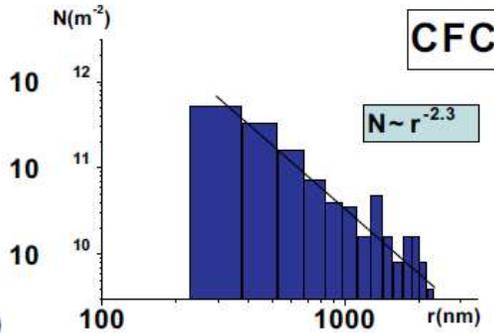
Теоретическая модель:

$$\begin{cases} V_n = V_{n-1} - c_1 r_n^3, \\ S_n = S_{n-1} + c_2 r_n^2, \\ r_{n+1} = c_3 \frac{V_n}{S_n}, \end{cases}$$

QSPA:



QSPA:



$$f(r) = \left| \frac{dn}{dr} \right| \propto r^{-\alpha}$$

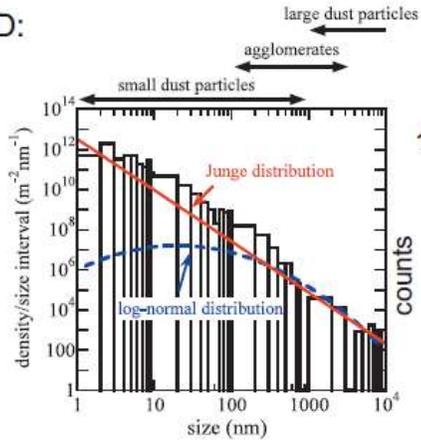
$$\alpha = 3 + \frac{1}{1 + c_1 c_3 / c_2}$$

$$r \sim 1 \text{ nm} \dots 10 \mu\text{m}$$

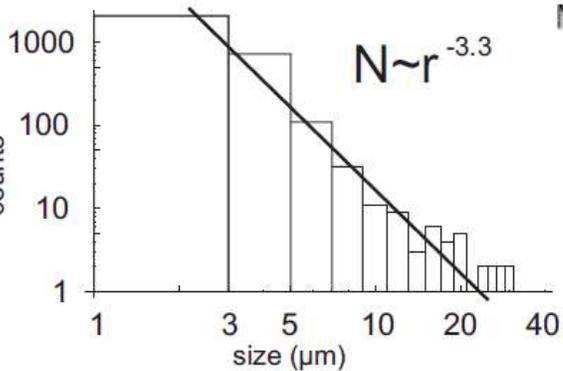
$$\alpha = 2.1 \dots 3.3$$

# Распределение пыли по размеру

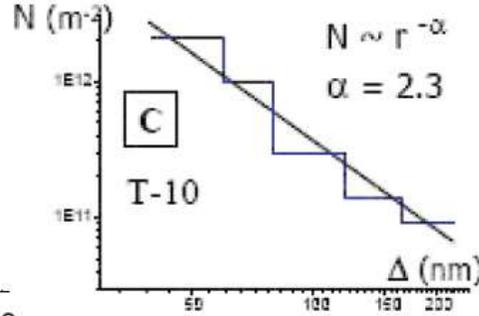
LHD:



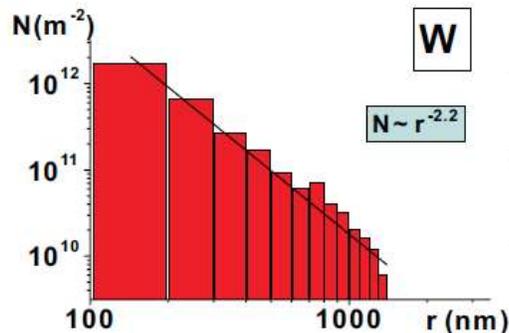
GOL-3:



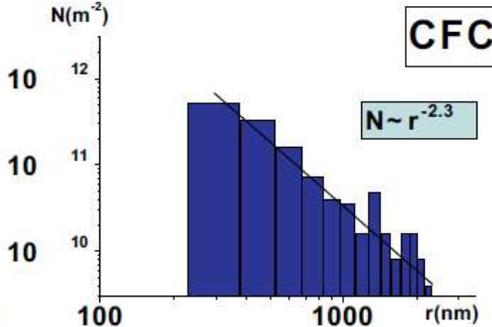
T-10:



QSPA:



QSPA:



- Размер частиц больше толщины слоя (поверхностное разрушение):  
 $\alpha=2-3$

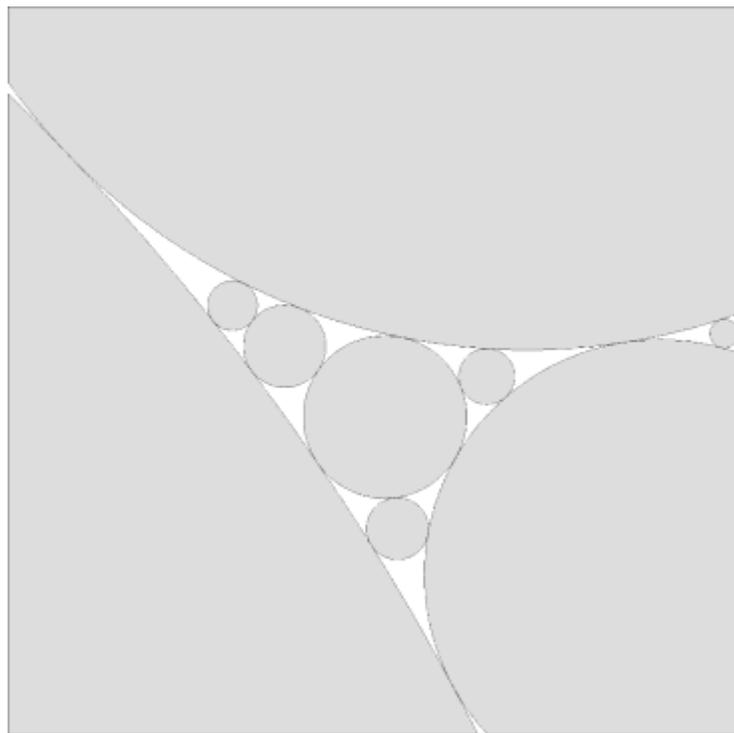
- Размер частицы меньше толщины слоя (объёмное разрушение)  
 $\alpha=3-4$

$$r \sim 1nm \dots 10\mu m$$

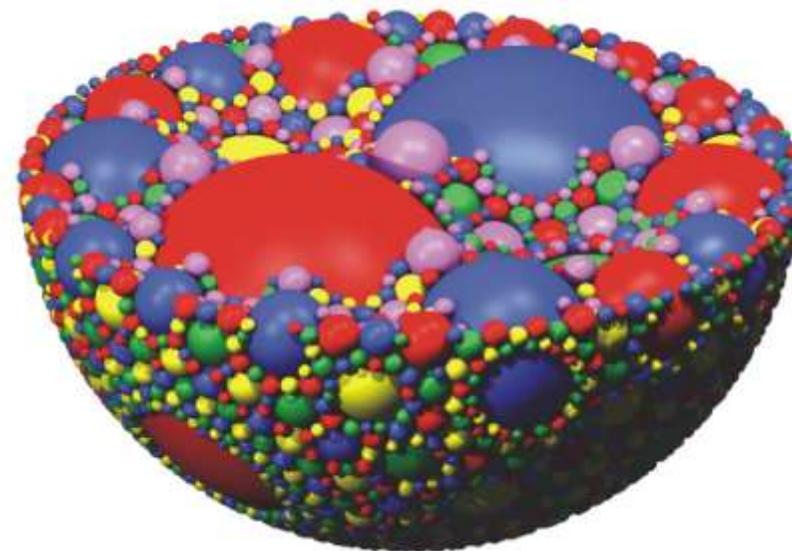
$$\alpha = 2.1 \dots 3.3$$

# Распределение пыли по размеру

Поверхностное  
разрушение



Объёмное  
разрушение

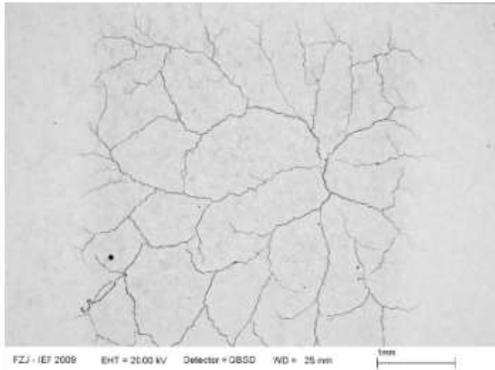


# Трещины на вольфраме

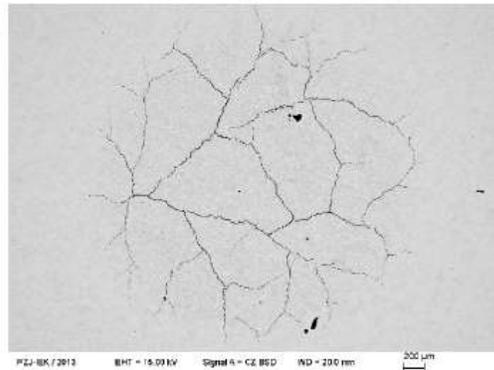
Общий вид

Увеличение

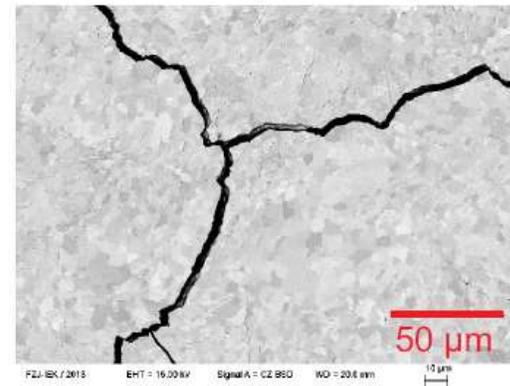
JUDITH-1 (Juelich):



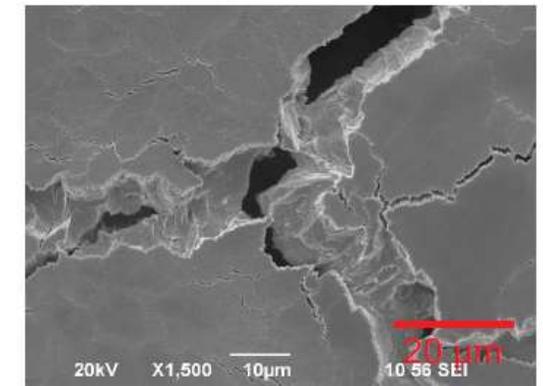
PSI-2 (Juelich):



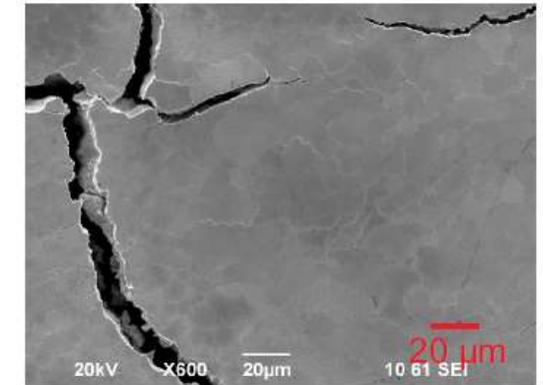
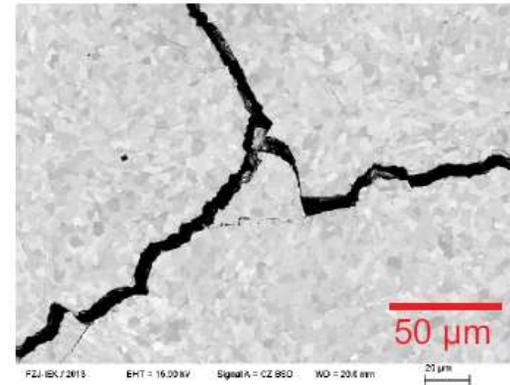
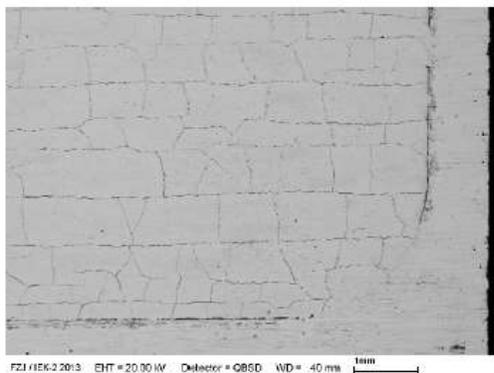
PSI-2 (Juelich):



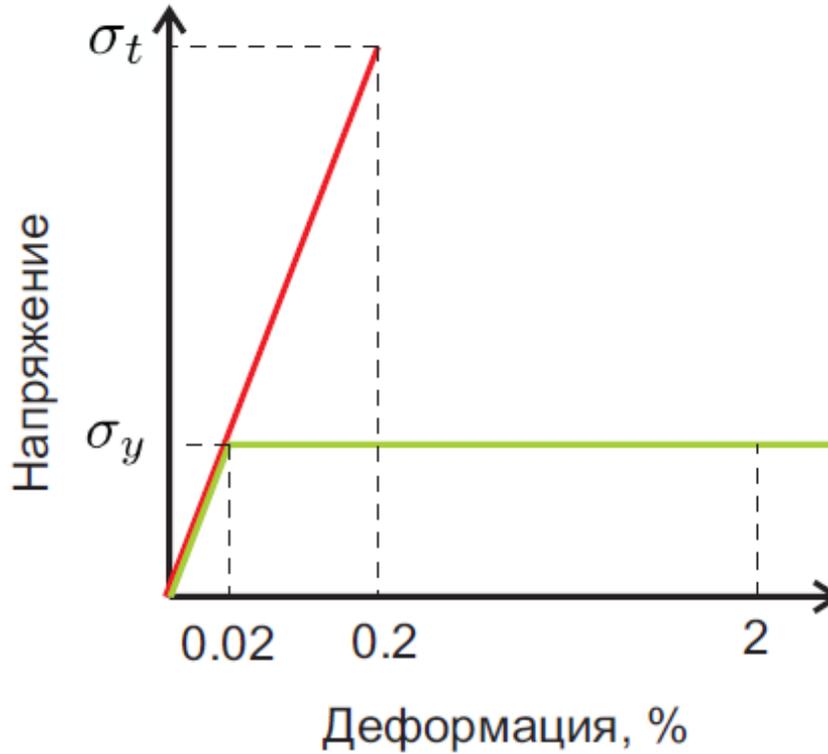
GOL-3 (Novosibirsk):



GOL-3 (Novosibirsk):

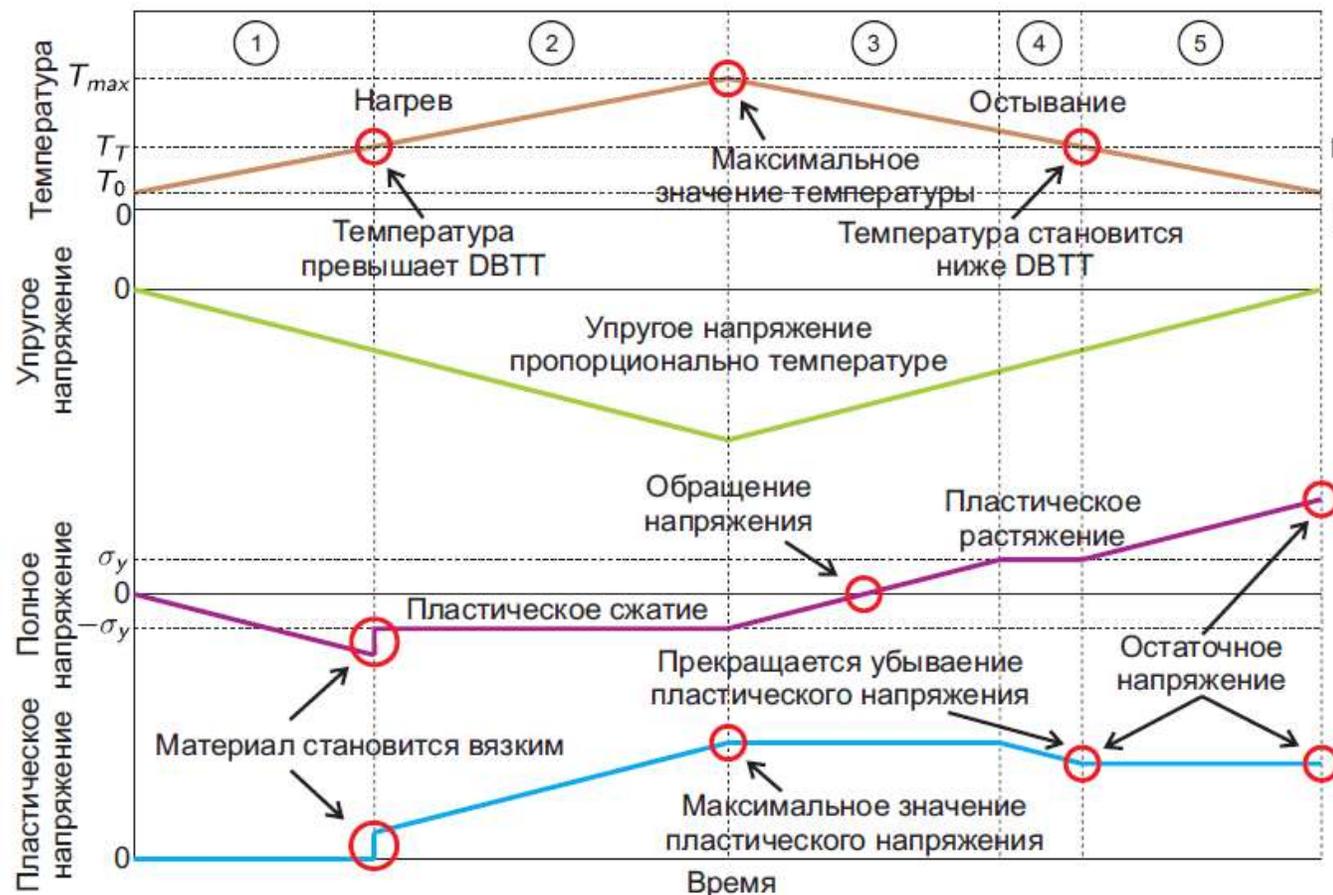


# Модель пластичности



Будем считать, что при температуре ниже  $T_T$  деформация происходит абсолютно хрупким образом (красная кривая), а выше – абсолютно вязким (зелёная кривая).

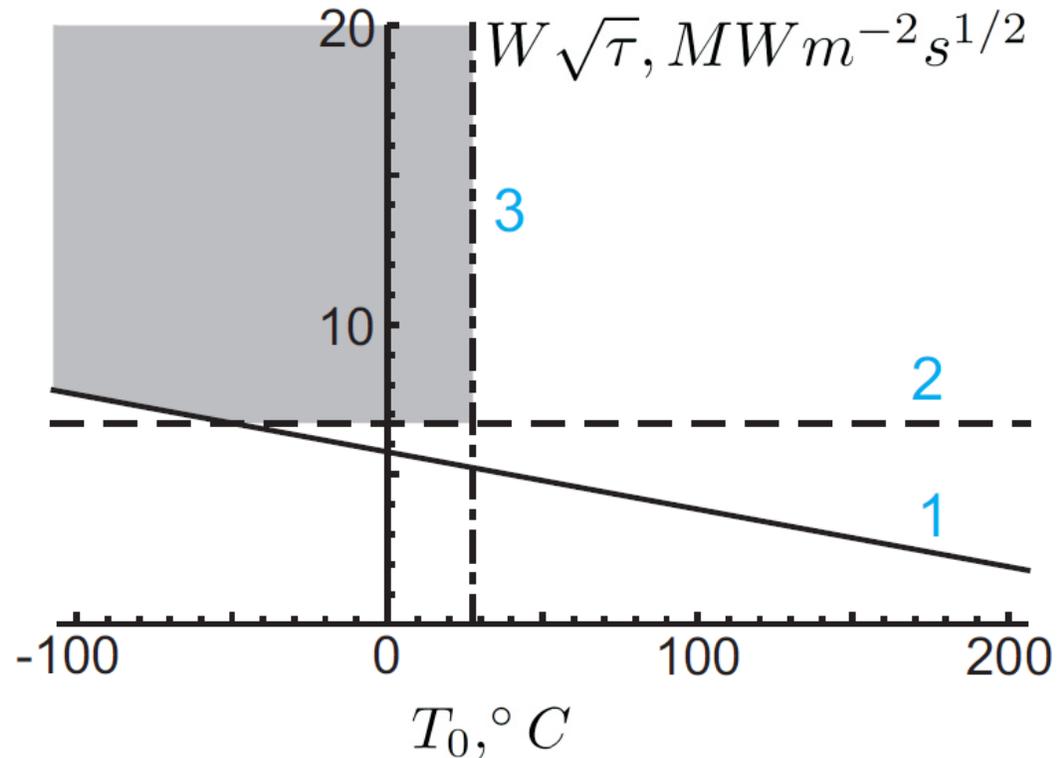
# Динамика во время импульсного нагрева и охлаждения



Для образования трещин нужно выполнить три условия:

1.  $T_{max} > T_T$ ,
2.  $\frac{\alpha E}{1-\sigma} (T_{max} - T_0) > \sigma_t + \sigma_y$ ,
3.  $T_0 < T_T - \frac{1-\sigma}{\alpha E} (\sigma_t - \sigma_y)$ .

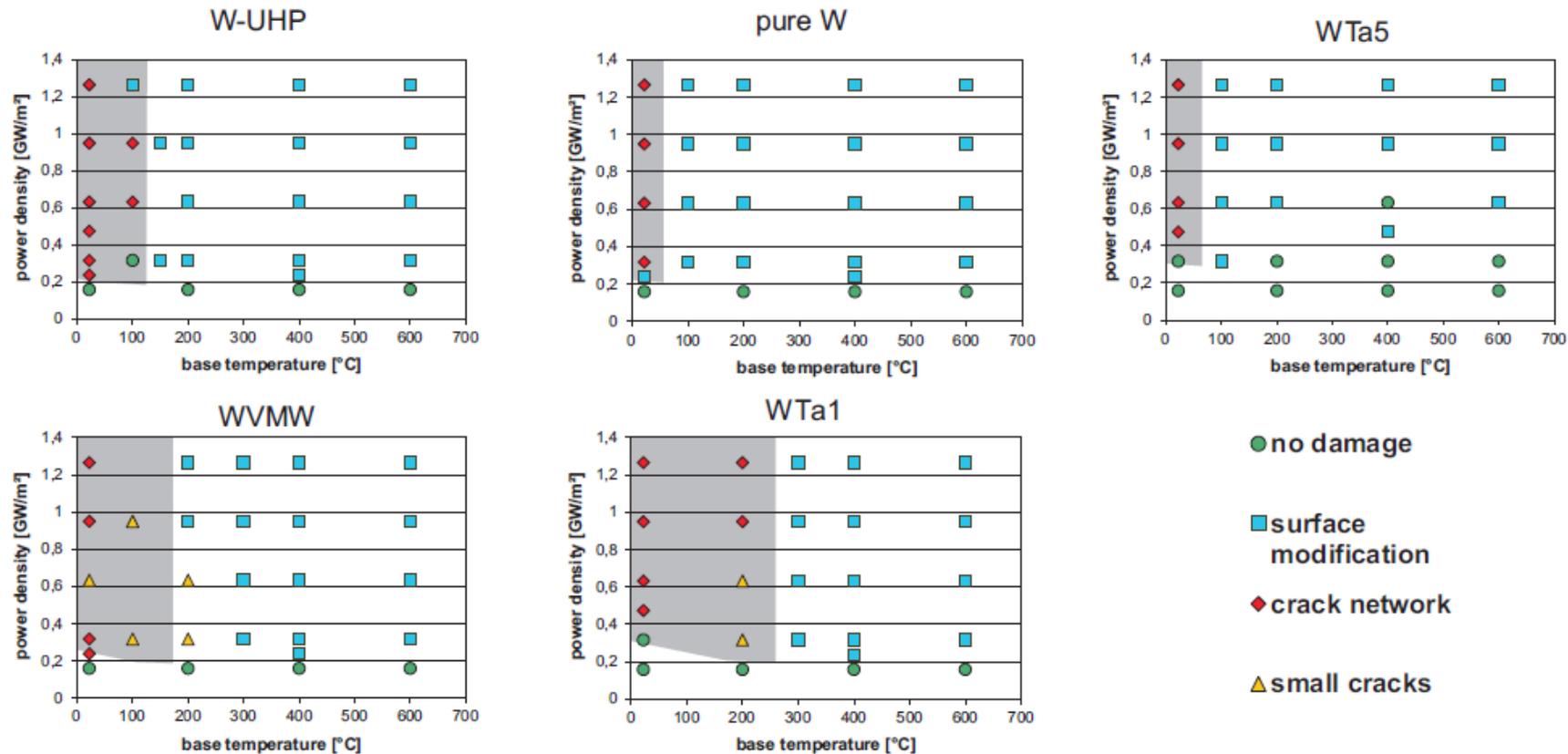
# Условия образования трещин



Для образования трещин  
нужно выполнить три условия:

1.  $T_{max} > T_T$ ,
2.  $\frac{\alpha E}{1-\sigma} (T_{max} - T_0) > \sigma_t + \sigma_y$ ,
3.  $T_0 < T_T - \frac{1-\sigma}{\alpha E} (\sigma_t - \sigma_y)$ .

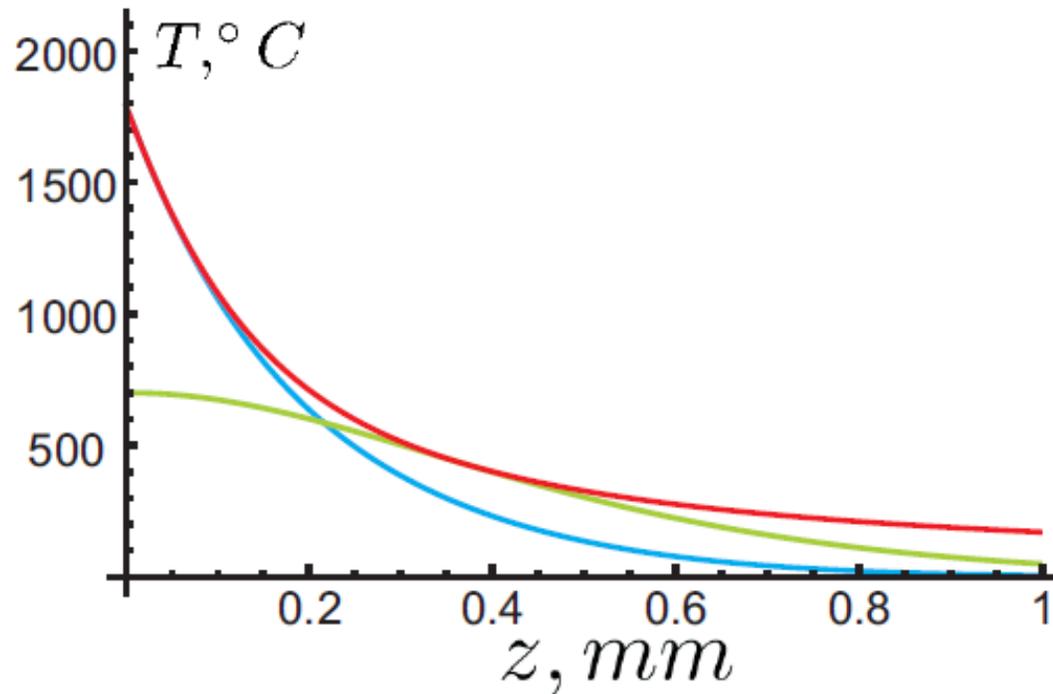
# Сравнение эксперимента и теории



Цветные точки – экспериментальные результаты.

Серый фон – полученная теоретически область образования трещин.

# Как правильно вычислить глубину трещины?



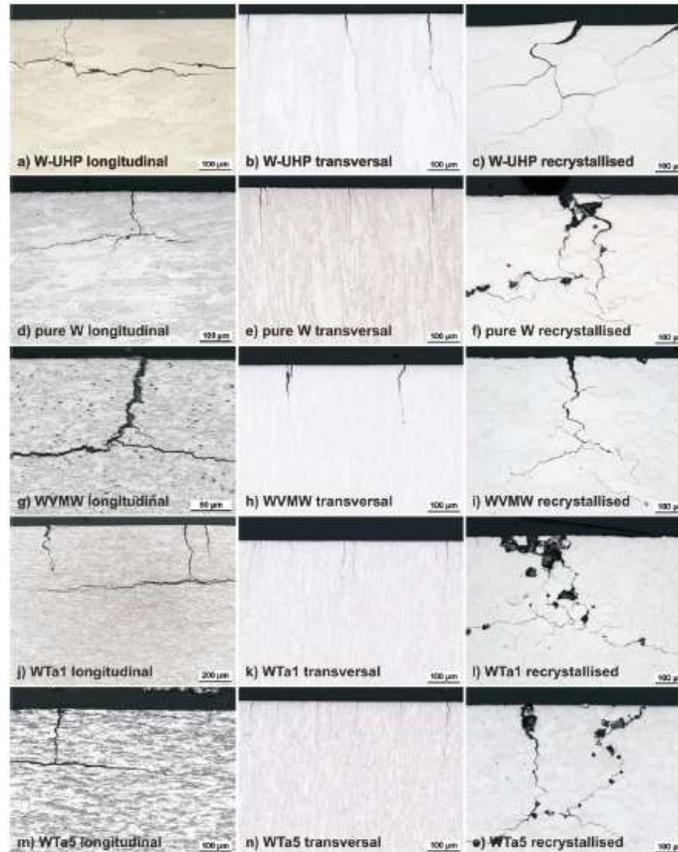
Синяя линия – температура в конце облучения,  
зелёная – температура в некоторый момент после облучения,  
красная – максимальная температура на заданной глубине.

Для образования трещин  
нужно выполнить три условия:

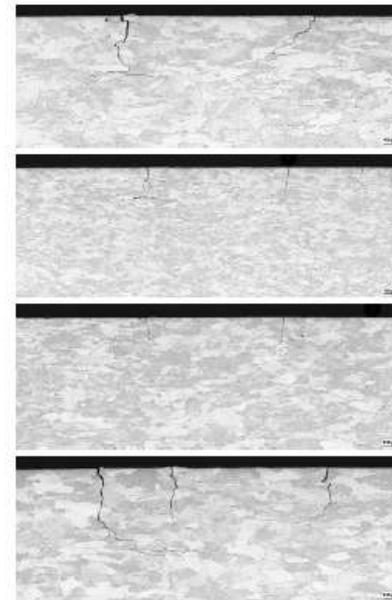
1.  $T_{max} > T_T,$
2.  $\frac{\alpha E}{1-\sigma} (T_{max} - T_0) > \sigma_t + \sigma_y,$
3.  $T_0 < T_T - \frac{1-\sigma}{\alpha E} (\sigma_t - \sigma_y).$

# «Горизонтальные» трещины

JUDITH-1 (Juelich):



PSI-2 (Juelich):



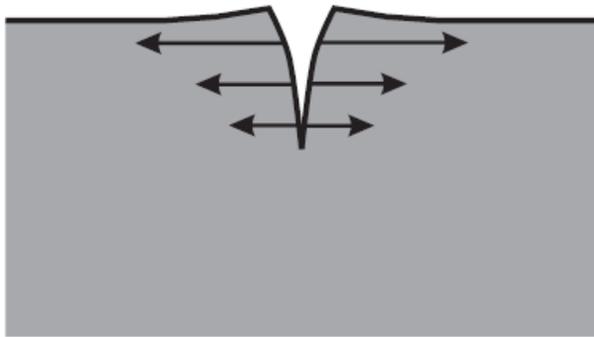
GOL-3 (Novosibirsk):



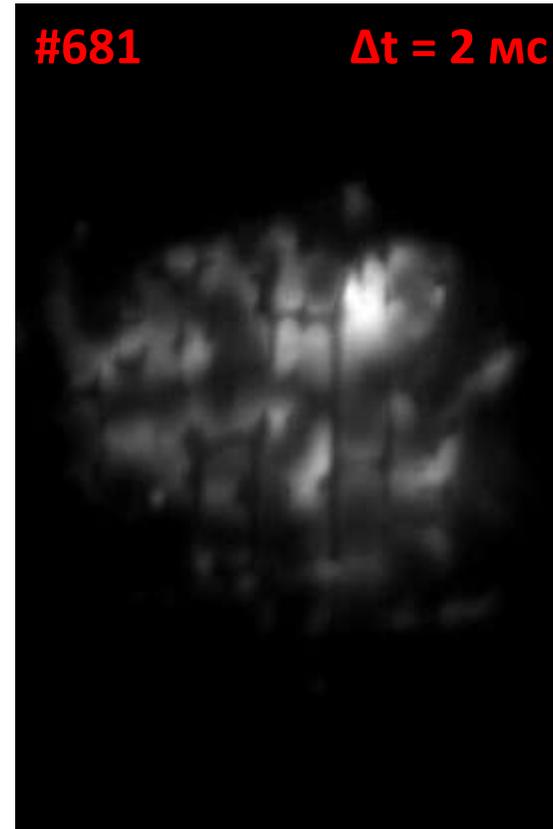
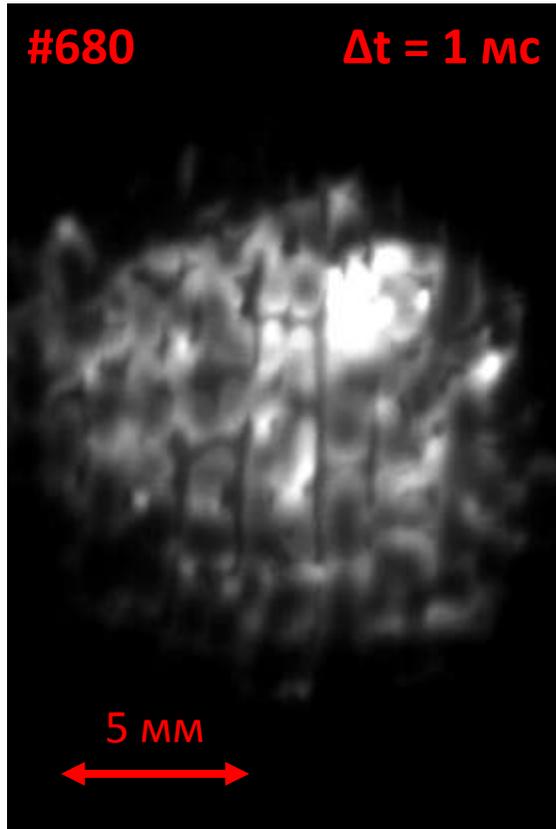
# Откуда берётся отрывающая сила?



- После образования «вертикальной» трещины верхний сжатый слой старается отогнуться



# Наблюдение «горизонтальных» трещин

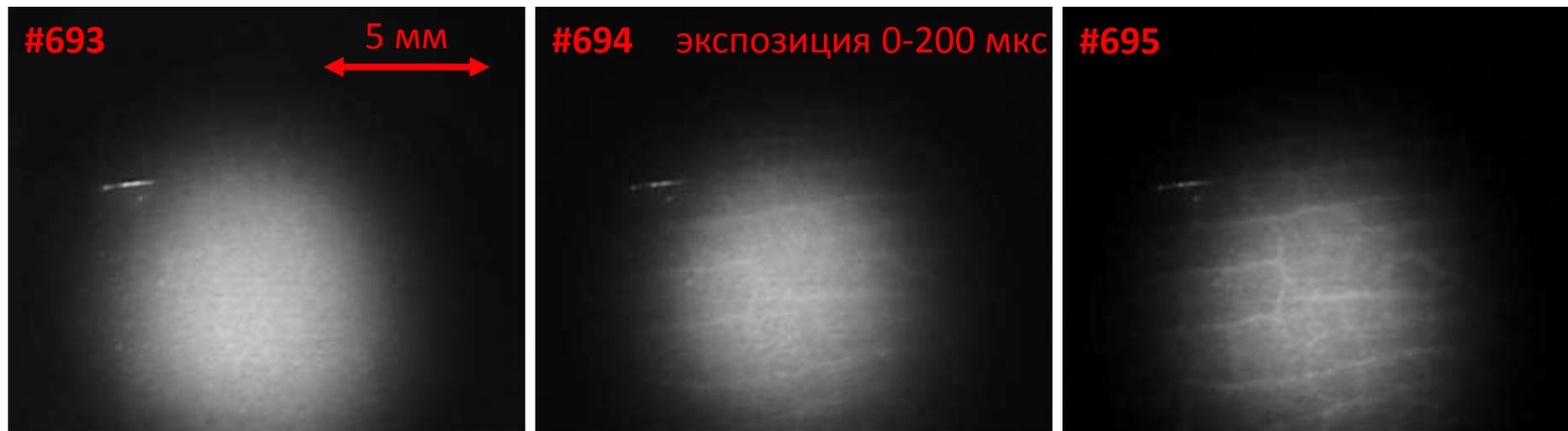


#680,  $E = 398$  Дж,  $T = 156$  мкс,  $F_{HF} = 79$  МДж  $m^{-2}s^{-1/2}$ ,  $F_{HF}/F_{HF0} = 1.58$

#681,  $E = 356$  Дж,  $T = 146$  мкс,  $F_{HF} = 73$  МДж  $m^{-2}s^{-1/2}$ ,  $F_{HF}/F_{HF0} = 1.46$

#683,  $E = 420$  Дж,  $T = 166$  мкс,  $F_{HF} = 82$  МДж  $m^{-2}s^{-1/2}$ ,  $F_{HF}/F_{HF0} = 1.64$

# Наблюдение «горизонтальных» трещин

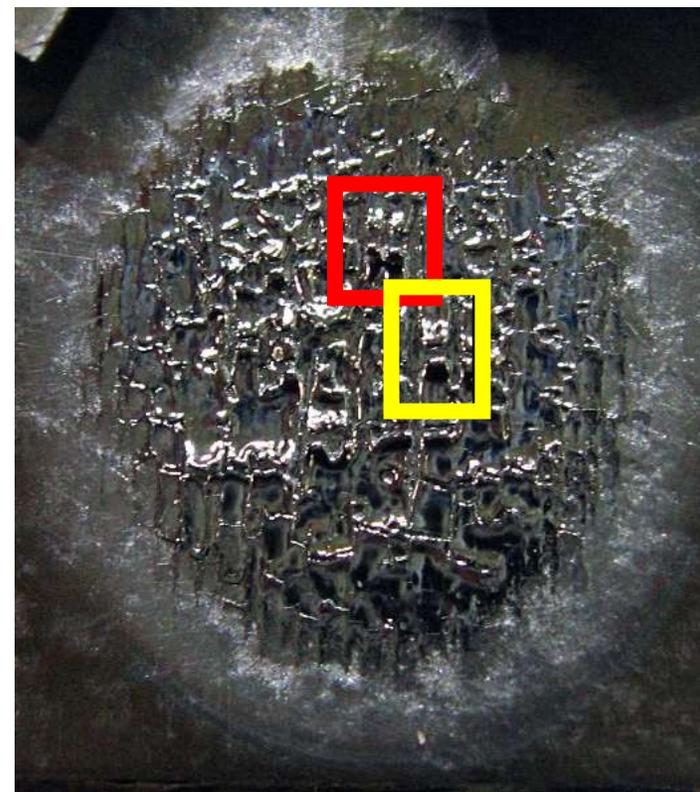
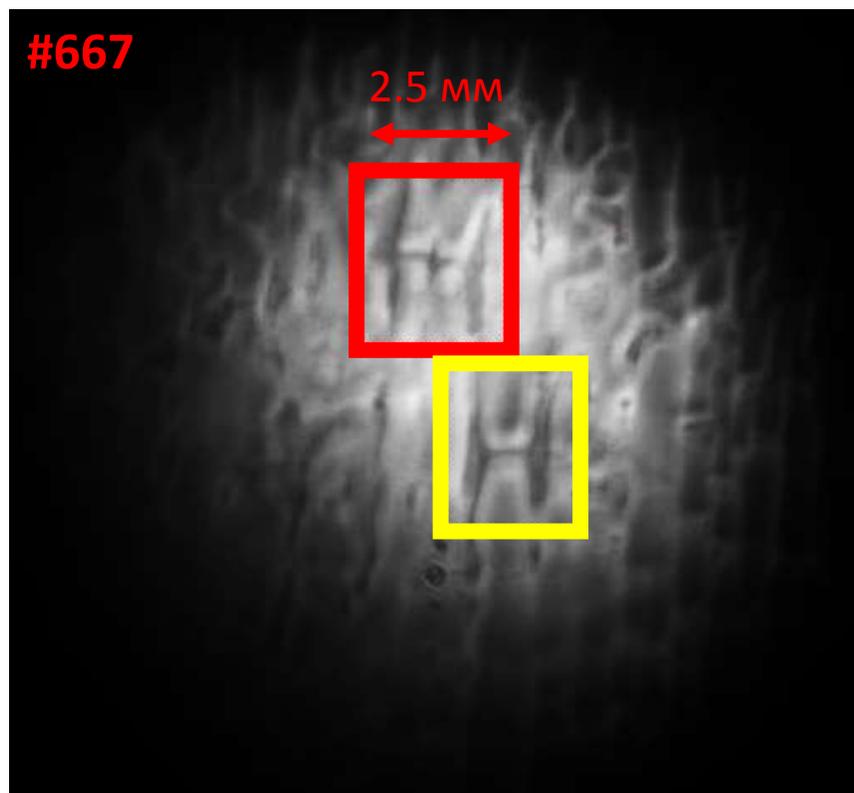


#693,  $E = 180$  Дж,  $T = 125$  мкс,  $F_{HF} = 40$  МДж  $m^{-2}c^{-1/2}$ ,  $F_{HF}/F_{HF0} = 0.8$

#694,  $E = 184$  Дж,  $T = 128$  мкс,  $F_{HF} = 40$  МДж  $m^{-2}c^{-1/2}$ ,  $F_{HF}/F_{HF0} = 0.8$

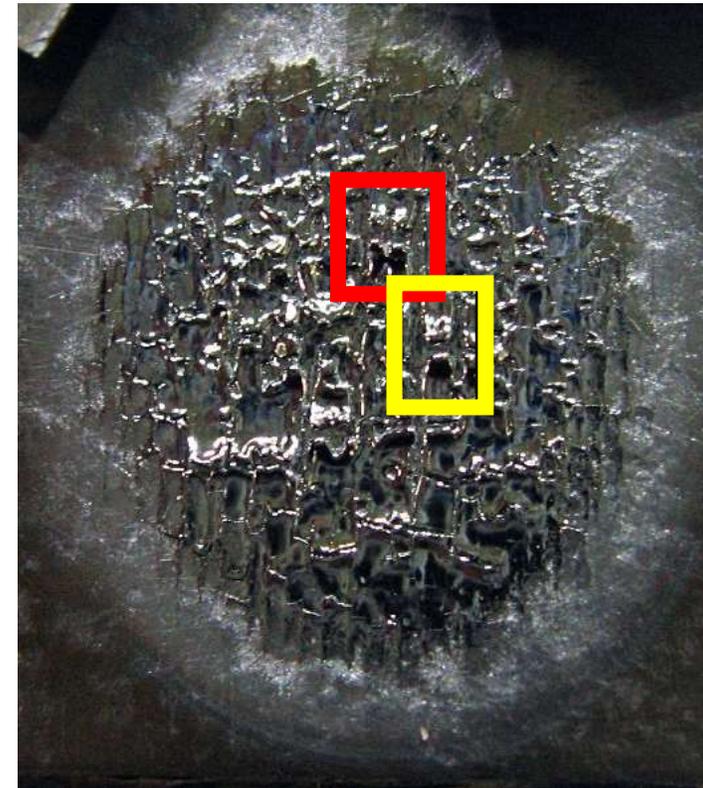
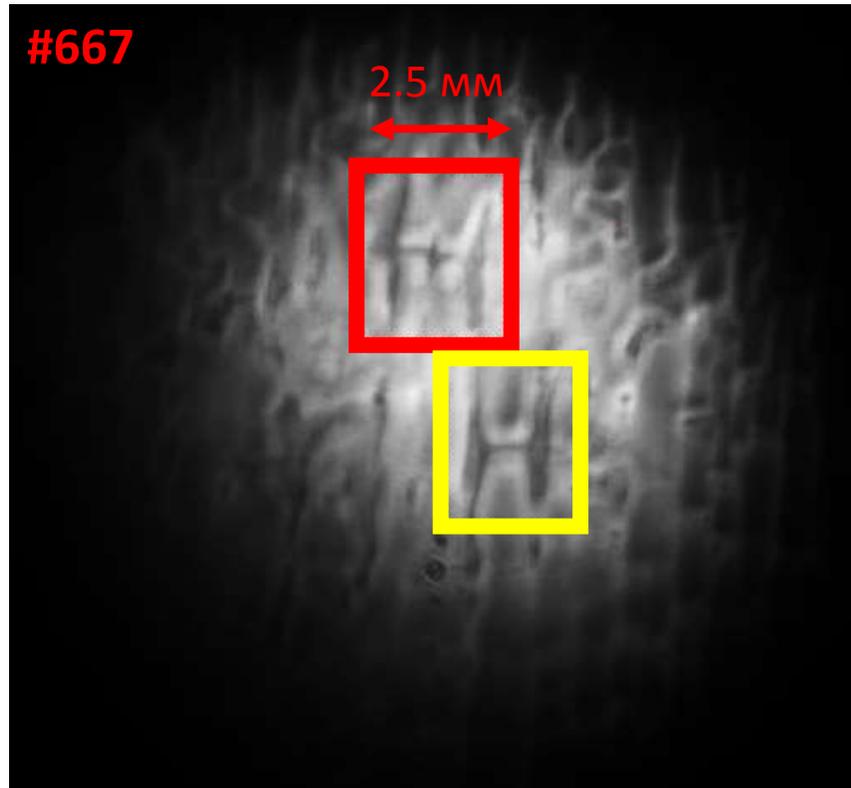
#695,  $E = 213$  Дж,  $T = 134$  мкс,  $F_{HF} = 46$  МДж  $m^{-2}c^{-1/2}$ ,  $F_{HF}/F_{HF0} = 0.92$

# Наблюдение «горизонтальных» трещин



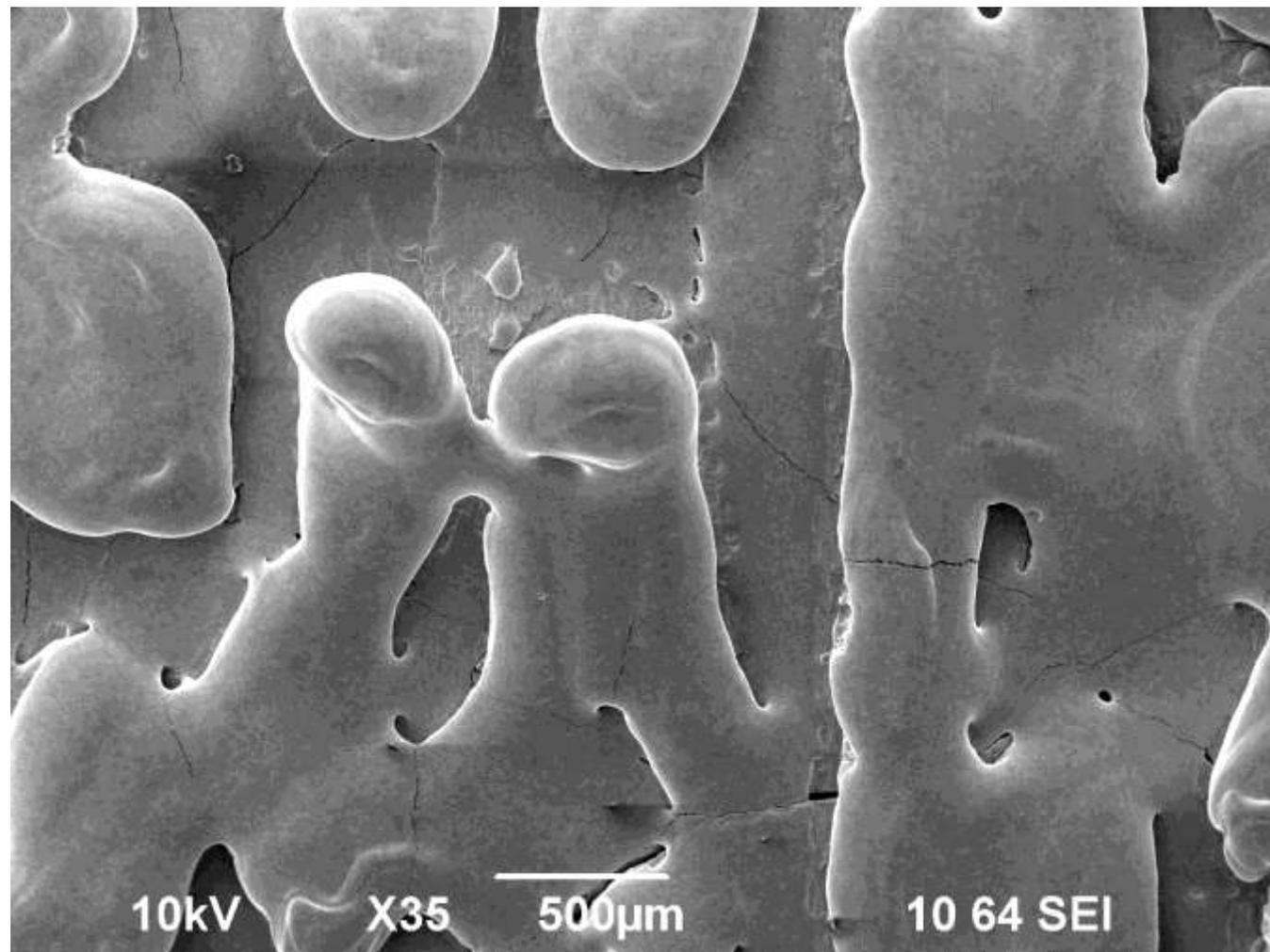
#667,  $E = 411$  Дж,  $T = 166$  мкс,  $F_{HF} = 80$  МДж  $m^{-2}s^{-1/2}$ ,  $F_{HF}/F_{HF0} = 1.6$   
 $\lambda = 900 - 1100$  нм

# Свечение поверхности нагретой мишени и её фотография после остывания

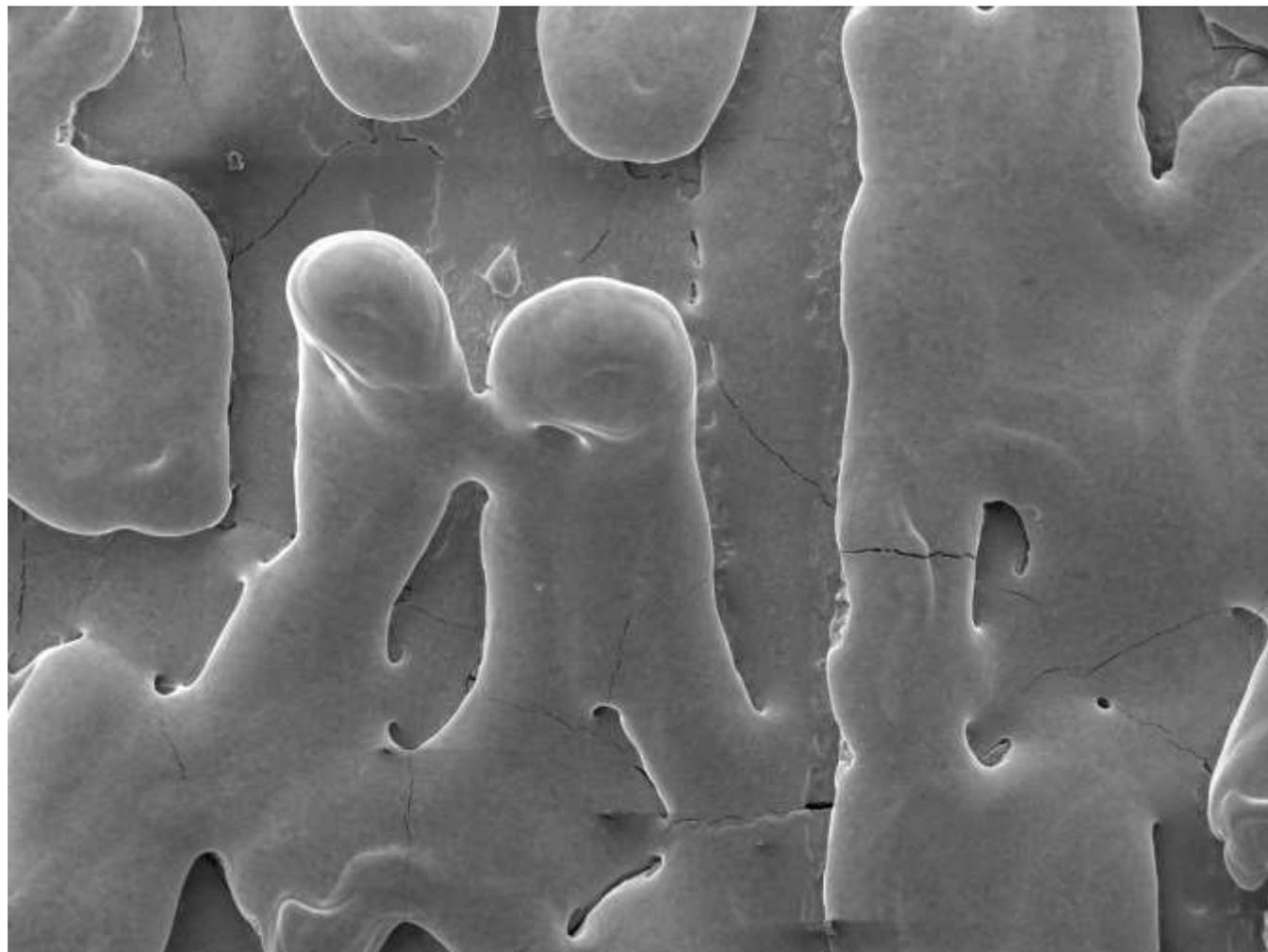


#667,  $E = 411$  Дж,  $T = 166$  мкс,  $F_{HF} = 80$  МДж м<sup>-2</sup>с<sup>-1/2</sup>,  $F_{HF}/F_{HF0} = 1.6$   
 $\lambda = 900 - 1100$  нм

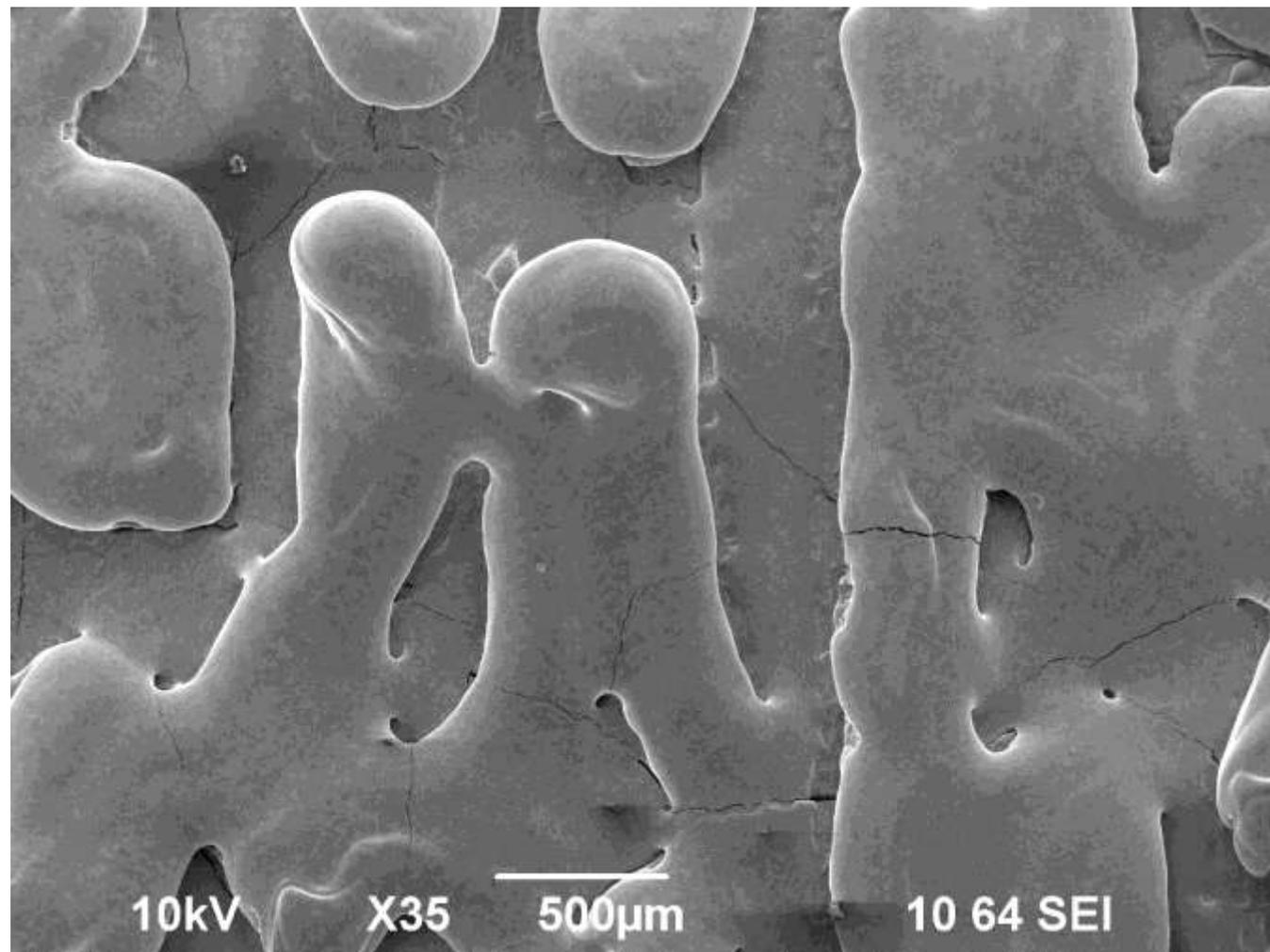
# Наблюдение «горизонтальных» трещин



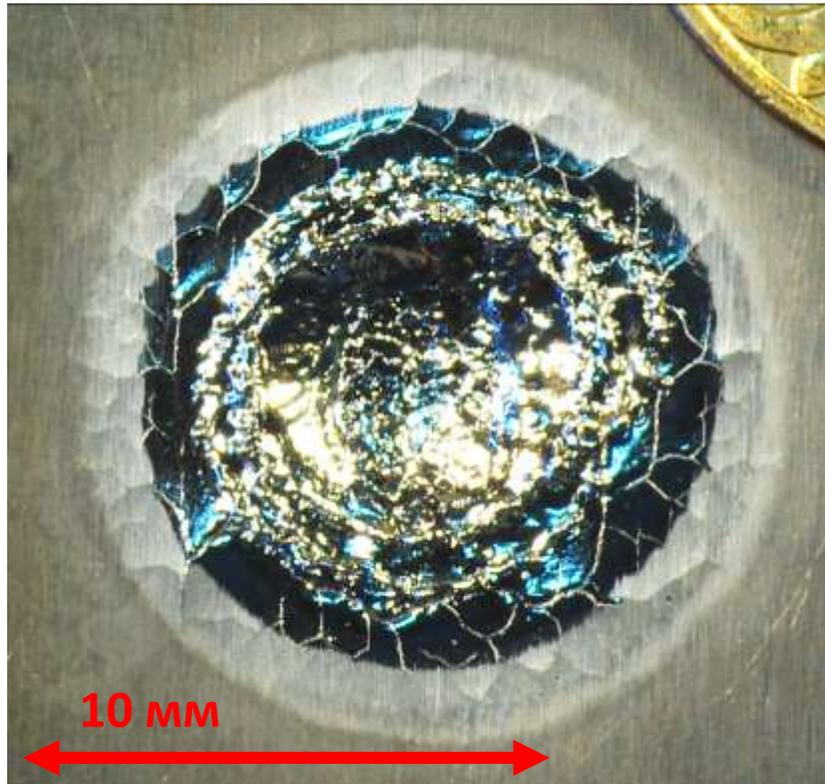
# Наблюдение «горизонтальных» трещин



# Наблюдение «горизонтальных» трещин

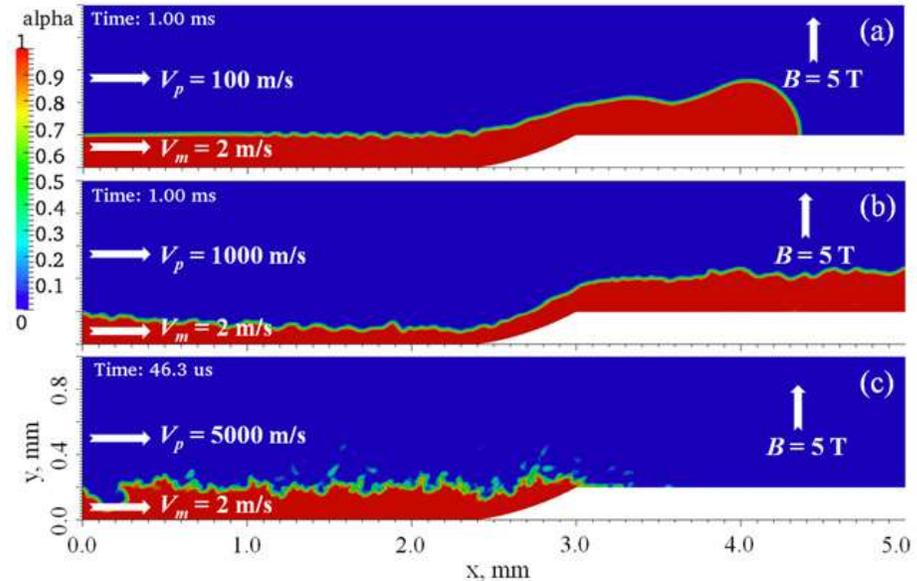


# Плавление вольфрама

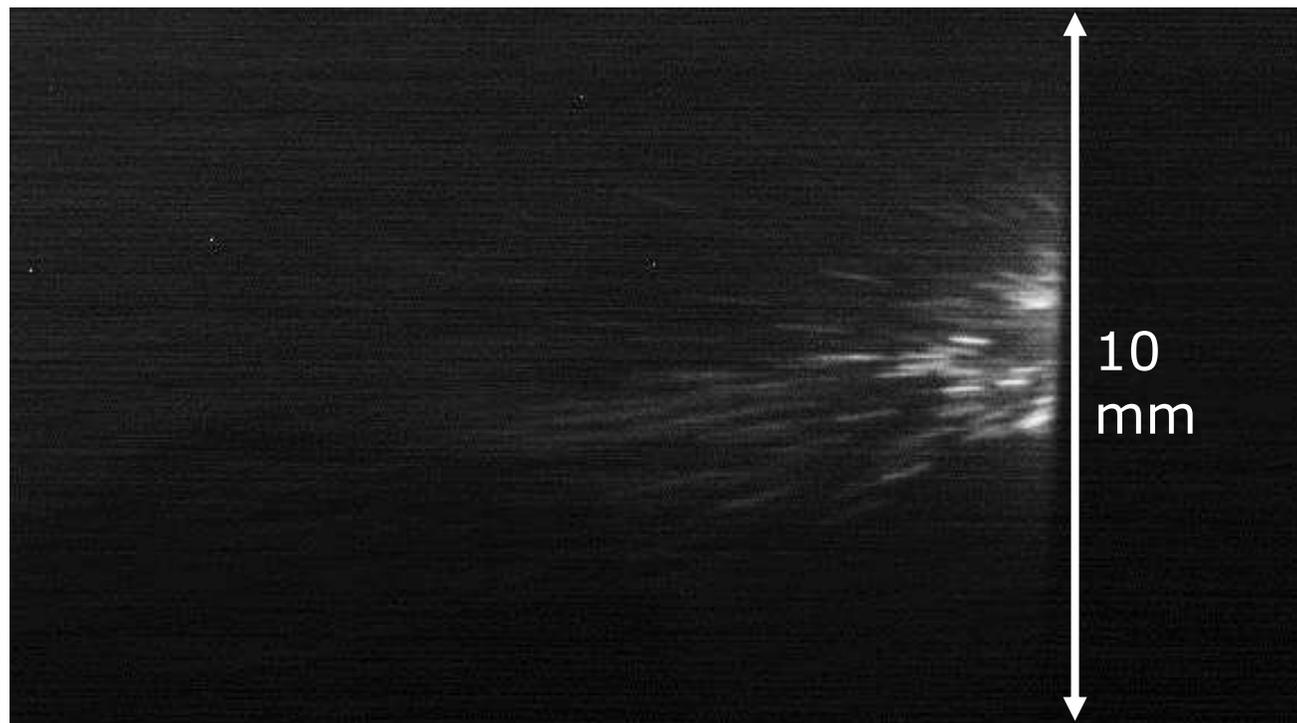


Основной обсуждаемый вопрос: силы, приводящие к течению расплава.

Сопутствующий вопрос: развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца



# Капли вольфрама



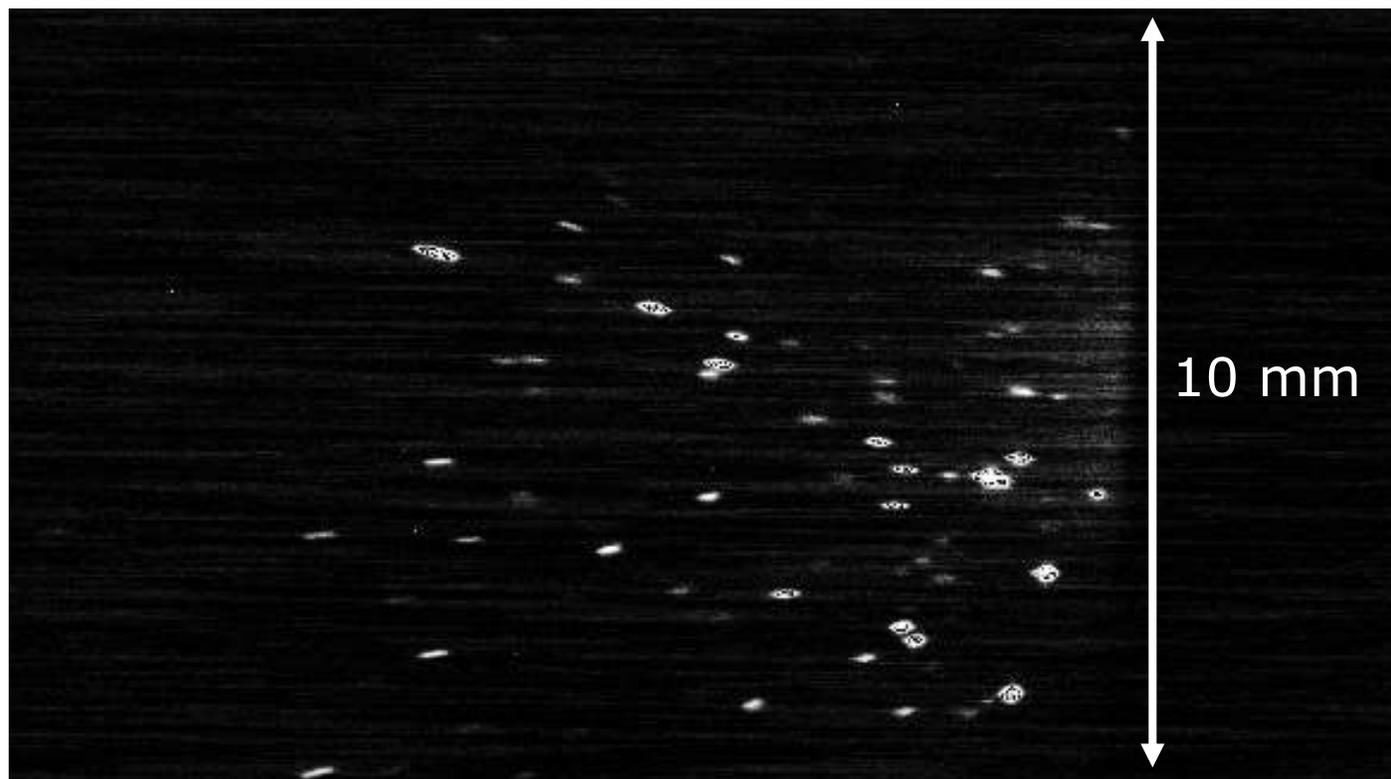
#14124,  $E = 291$  Дж,  $t = 150$  мкс

$F_{HF} = 114$  МДж  $m^{-2}s^{-1/2}$ ,  $F_{HF} / F_{HF0} = 2.28$

ЭКСПОЗИЦИЯ 170 - 177 мкс

$V \approx 200 - 220$  м/с **спустя 20 мкс после окончания пучка**

# Капли вольфрама



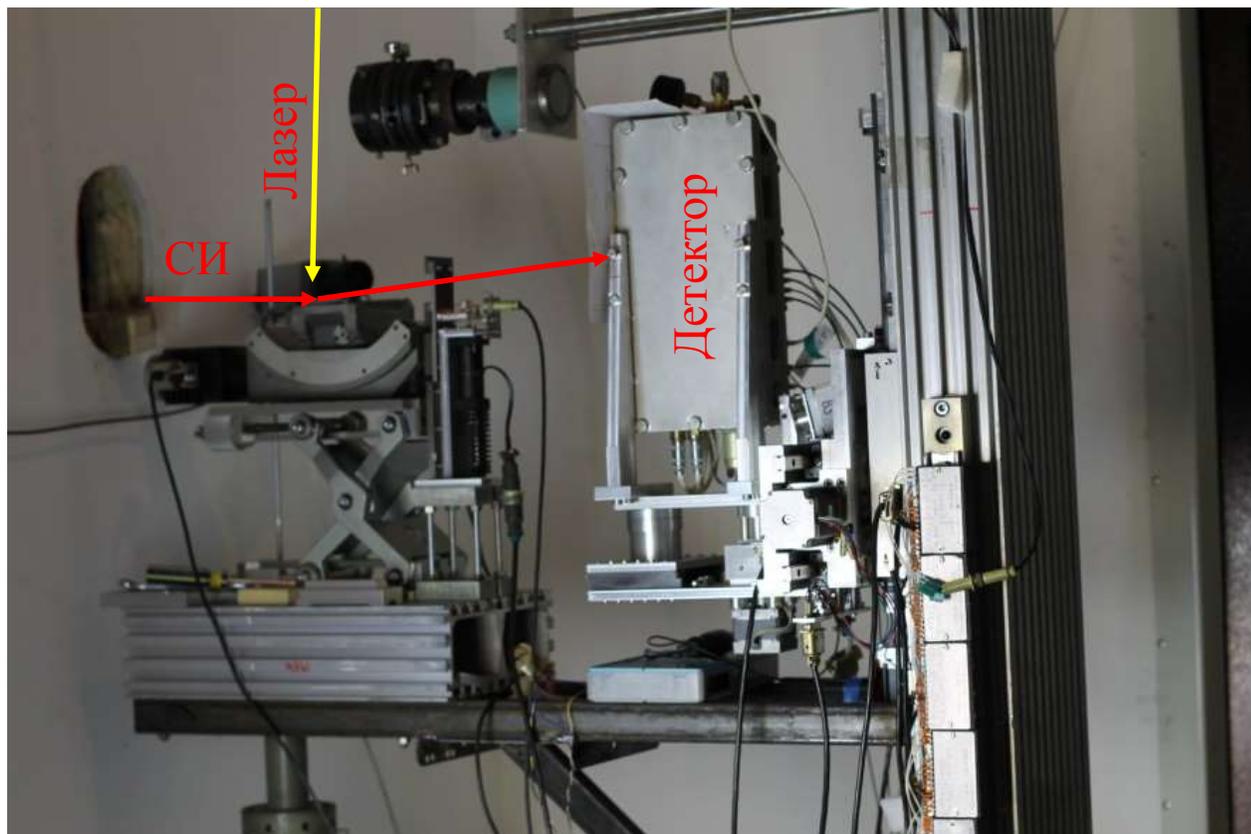
#14112,  $E = 302$  Дж,  $t = 150$  мкс

$F_{HF} = 117$  МДж  $m^{-2}s^{-1/2}$ ,  $F_{HF} / F_{HF0} = 2.34$

экспозиция 350 - 357 мкс

$V \approx 50 - 80$  м/с **спустя 200 мкс после окончания пучка**

# Станция рассеяния синхротронного излучения «Плазма»



Основная задача:

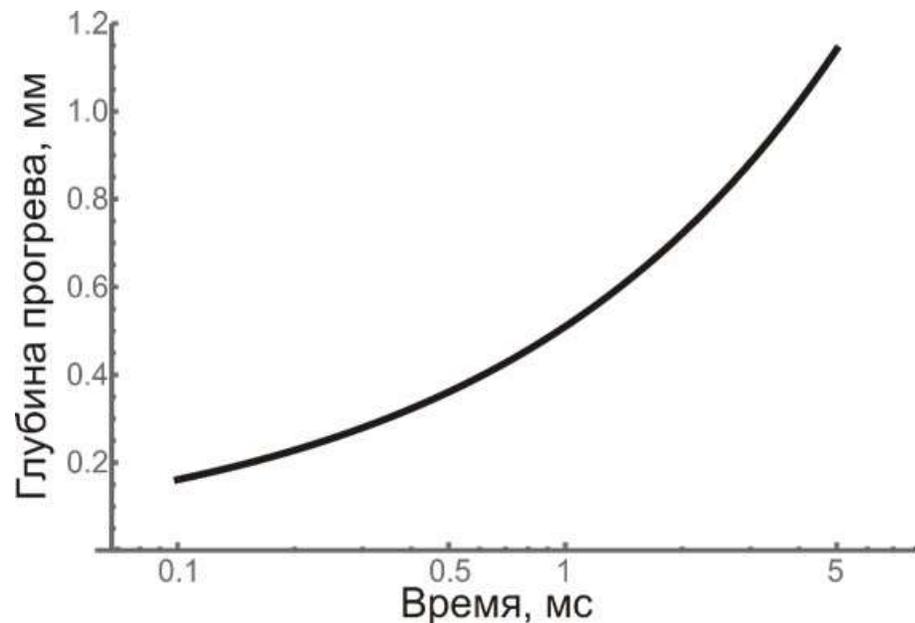
- Демонстрация динамических измерение с пространственным разрешением внутри вольфрама при импульсном облучении

Преимущества СИ:

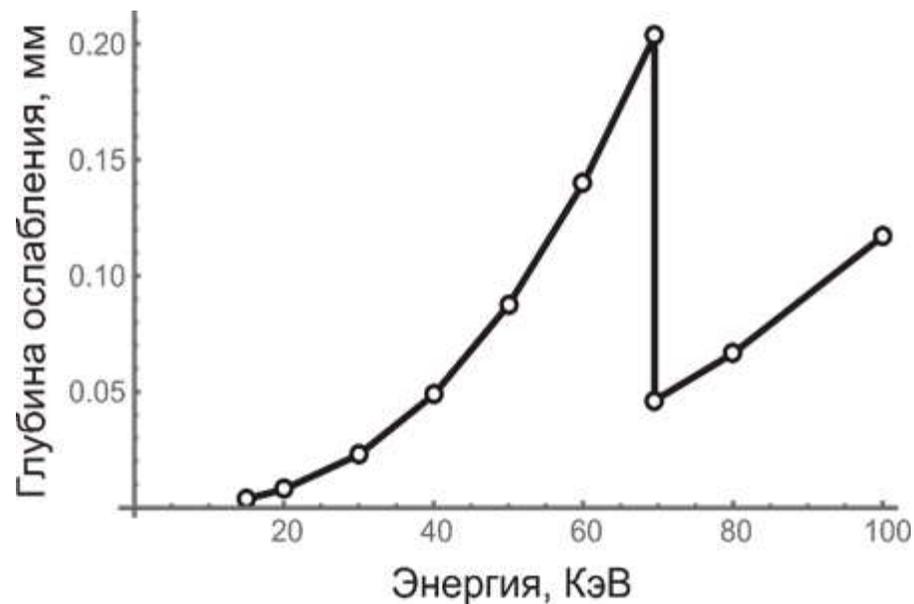
- Быстрые измерения
- Измерения внутри материала
- Отсутствие экранирования плазмой

# Станция рассеяния синхротронного излучения «Плазма»

Дистанция прогрева:



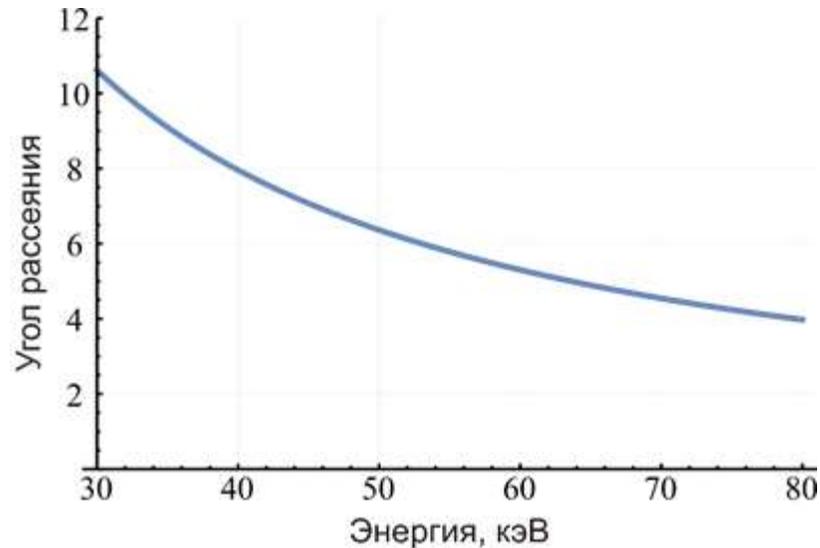
Дистанция ослабления СИ:



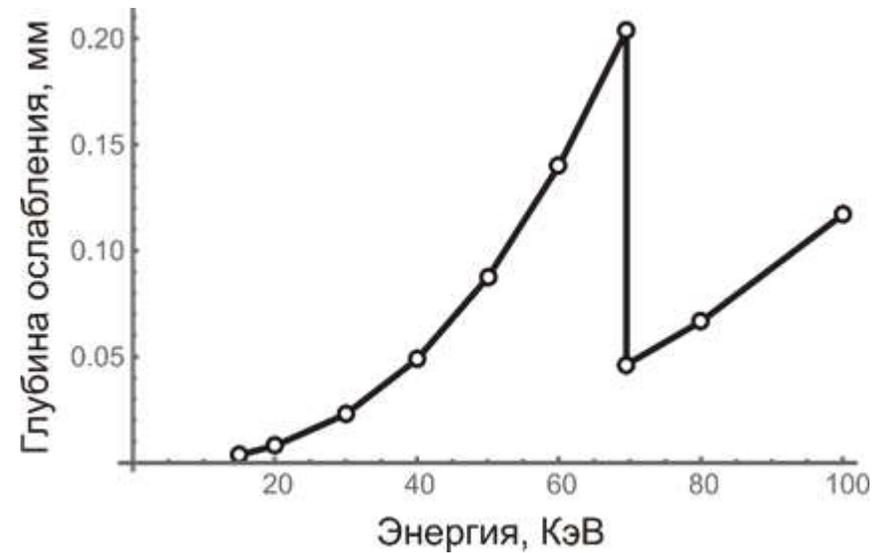
Вывод: разумная толщина образца 0.2-1 мм.

# Станция рассеяния синхротронного излучения «Плазма»

Угол рассеяния СИ:



Дистанция ослабления СИ:

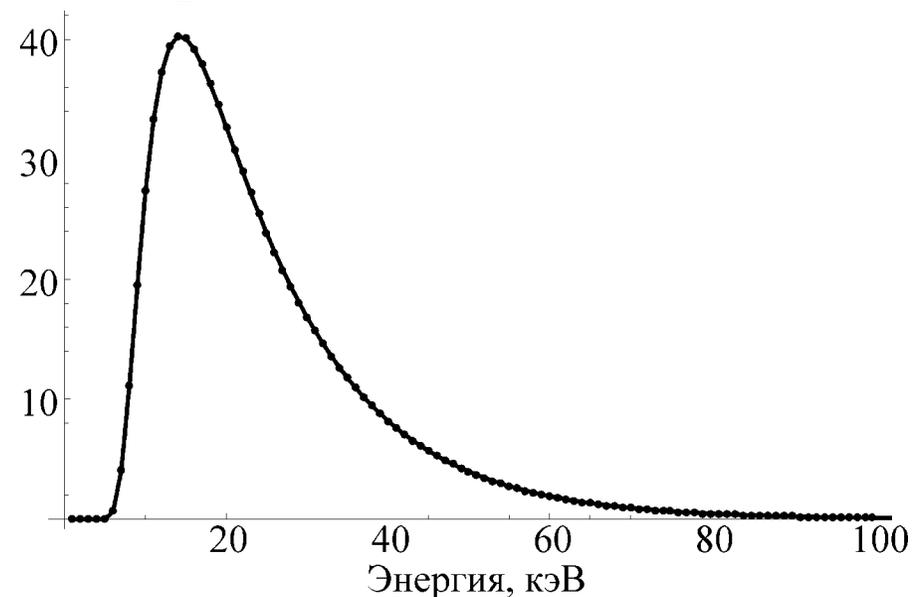


Выводы:

- Можно работать только на просвет. При отражении глубина проникновения не более десятков микрон.
- Будут проблемы с яркостью. Надо использовать дифракцию на монокристаллических образцах.

# Дифракция СИ

Спектр ВЭПП-4:



Выводы:

- Все эффекты связанные с изменением расстояния между кристаллическими плоскостями малы.

Условие Брэгга-Вульфа:

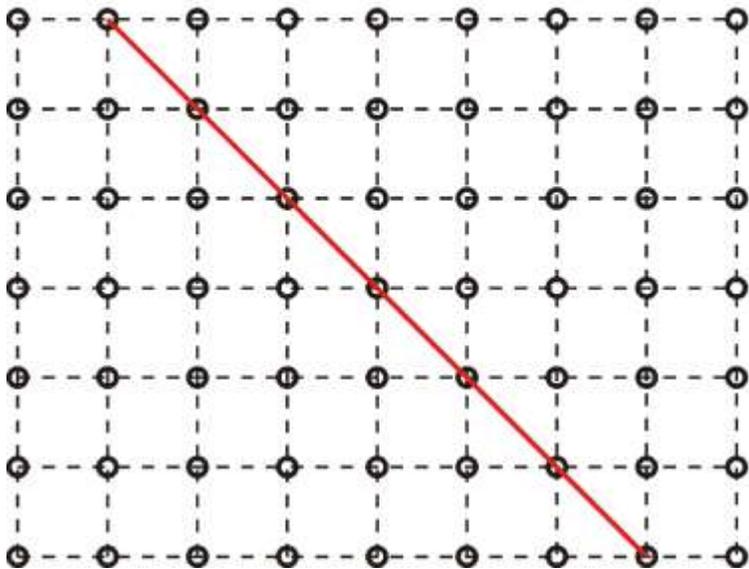
$$2d \sin \theta = n\lambda$$

где  $d$  — межплоскостное расстояние,  $\theta$  — угол падения на кристаллическую плоскость,  $n$  — порядок дифракционного максимума,  $\lambda$  — длина волны.

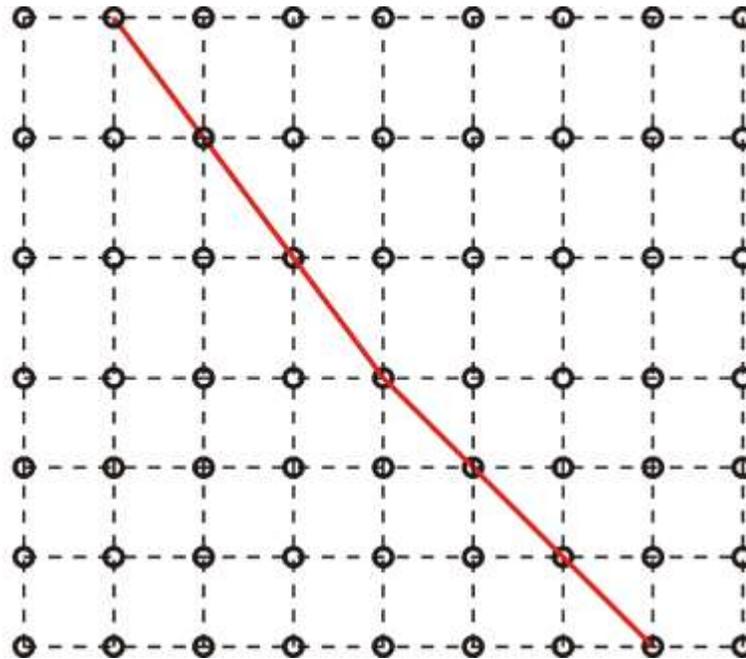
**Угол падения на кристаллическую плоскость равен углу отражения.**

# Основной эффект: поворот кристаллических плоскостей

Кристаллическая плоскость [110]:



После нагрева верхней половины:

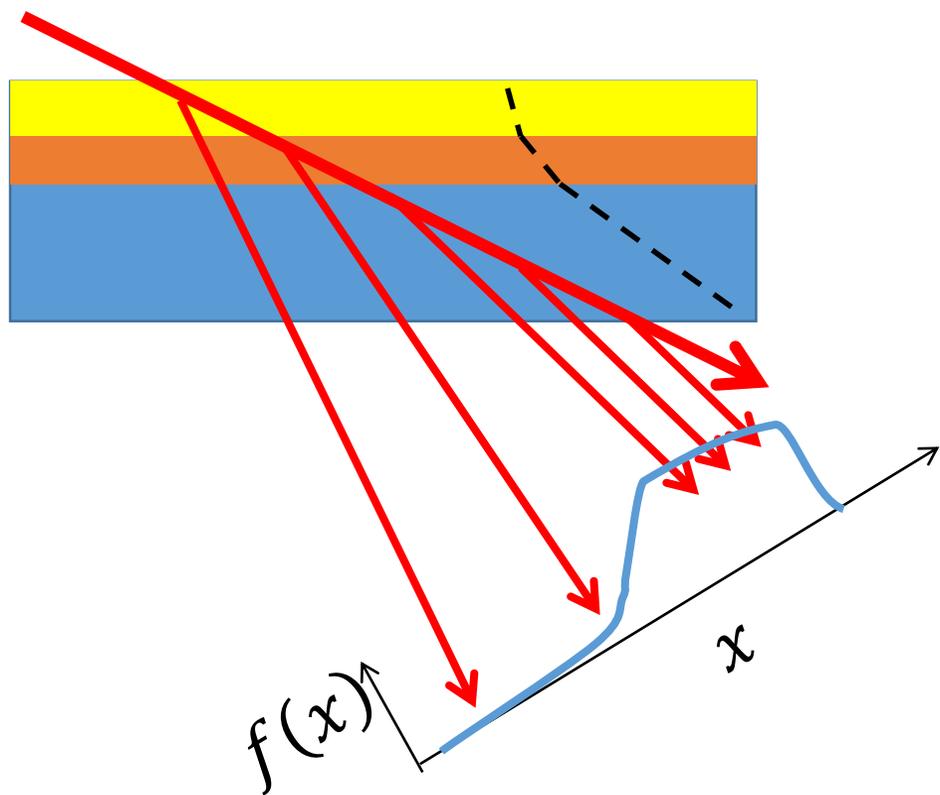


Оценка изменения угла:

- При упругой деформации:  $0.1^\circ$
- При пластической деформации:  $10^\circ$

# Схема эксперимента

Физическая схема:



Техническая схема:

