

*Магистерская диссертация:*

*«Структурно-фазовое состояние титана,  
легированного под воздействием  
электронных пучков»*

*Магистрант*

*Шиманский Виталий Игоревич*

*Научный руководитель –*

*профессор Углов Владимир Васильевич*

# Содержание

---

- Актуальность
- Цели и задачи
- Объект исследования
- Схема эксперимента
- Научная гипотеза
- Теоретический расчет температурных полей
- Элементный состав
- Морфология поверхности
- Ячеистая и дендритная структура
- Фазовый состав
- Параметр решетки  $\beta$ -фазы
- Микронапряжения в  $\alpha$ -фазе
- Механические свойства (твердость)
- Научная новизна
- Положения, выносимые на защиту



# Актуальность

---

Упрочнение титана и титановых сплавов является актуальным направлением современного материаловедения. Наиболее перспективный метод модификации поверхностных слоев металлов состоит в использовании концентрированных потоков энергии, в частности сильнофокусированных электронных пучков, позволяющих воздействовать на поверхность материала без изменения его химического состава.

## Связь с научными программами:

- ГПОФИ Республики Беларусь «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии» (2006 – 2010 гг.)
- ГКПНИ Республики Беларусь «Кристаллические и молекулярные структуры» (2006 – 2010 гг.)



# Цели и задачи

---

**Цель работы:** Установить взаимосвязь структурно-фазового состояния и механических свойств поверхностных слоев титана, легированного атомами молибдена под воздействием сильнофокусированных электронных пучков.

**Задачи исследования:**

- Сформировать поверхностные слои в результате предварительного нанесения покрытия молибдена и последующего воздействия электронных пучков с поглощенной энергией 15 -35 Дж/см<sup>2</sup>
- Применить методы растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, рентгеновской дифракции для установления структурно-фазового состояния модифицированных слоев
- Исследовать механические свойства титана и установить взаимосвязь со структурно-фазовым состоянием



# Объект исследования

---

**Объект исследования:** сплав титана высокой чистоты VT1-0  
(состав в ат.: 0.18 – Fe; 0.12 – O; 0.07 – N; 0.04 – C)

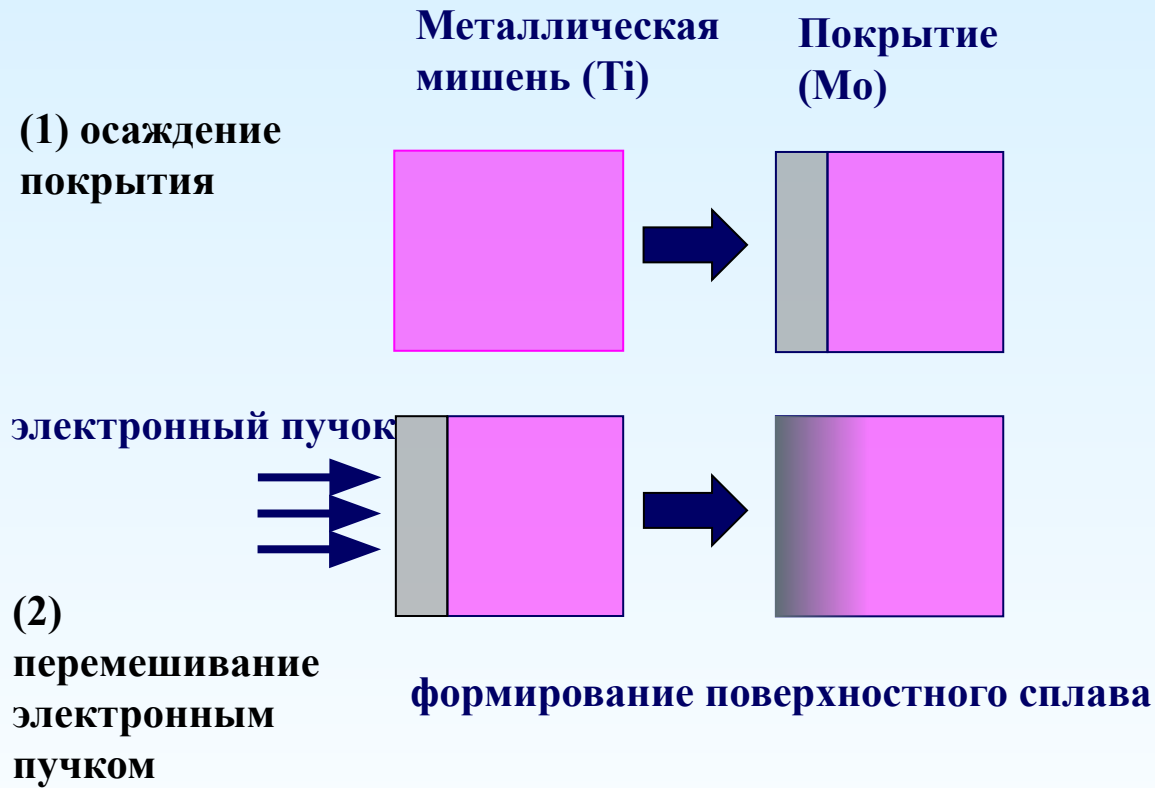
**1 этап:** Нанесение покрытия молибдена вакуумно-дуговым методом (установка ВУ2-МБС). Параметры эксперимента: ток дуги 180 А, опорное напряжение -120 В, время осаждения 7 минут. Толщина покрытия 1 мкм.

**2 этап:** Воздействие на сформированные системы сильноточными электронными пучками (установка SOLO-M). Параметры эксперимента: вакуум  $10^{-2}$  Па, длительность импульсов 50 мкс, частота импульсов 0,3 Гц, количество импульсов – 3, плотность поглощенной энергии изменялась от 15 до 35 Дж/см<sup>2</sup>.



# Схема эксперимента

---



# Научная гипотеза

---

Воздействие сильнофокусированных электронных пучков на системы «покрытие/подложка» позволит сформировать глубокие (свыше 10 мкм) легированные слои, характеризующиеся повышенными механическими параметрами, за счет происходящих структурно-фазовых превращений, обусловленных неравновесностью протекающих процессов.



# Теоретический расчет температурных полей

Решение классического уравнения теплопроводности:

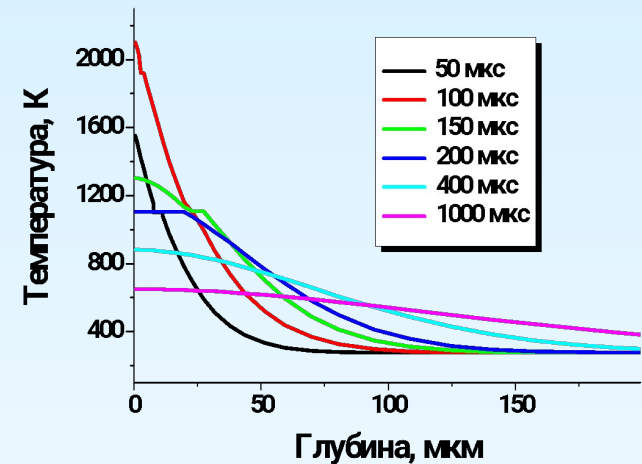
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(x, T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right) = c(x, T) \rho(x) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t}$$

Граничные и начальные условия:

$$-k(x, t) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = W \quad T(x, 0) = T_0$$

Преобразование температурного поля для учета фазовых переходов первого рода:

$$T(x, t) = \begin{cases} T(x, t), & T \leq T_{\text{пл}} \\ T_{\text{пл}}, & T_{\text{пл}} < T < T_{\text{пл}} + \Delta T \\ T(x, t) - T_{\text{пл}}, & T \geq T_{\text{пл}} + \Delta T \end{cases} \quad ct\Delta T = \lambda t$$



*Скорость охлаждения:*

$10^6 - 10^7$  К/с

*Градиент температуры:*

$10^8$  К/м

*Условие плавления*

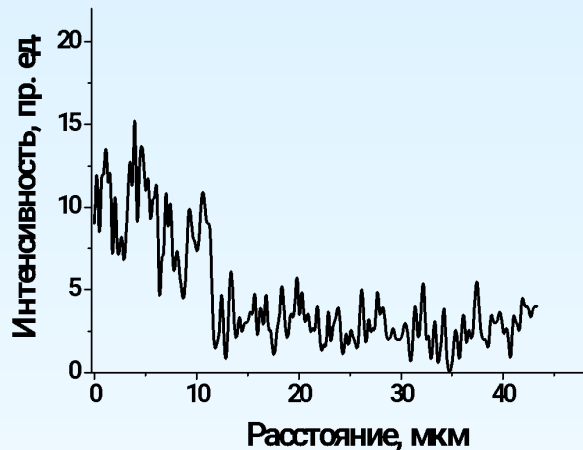
$E > 9$  Дж/см<sup>2</sup>



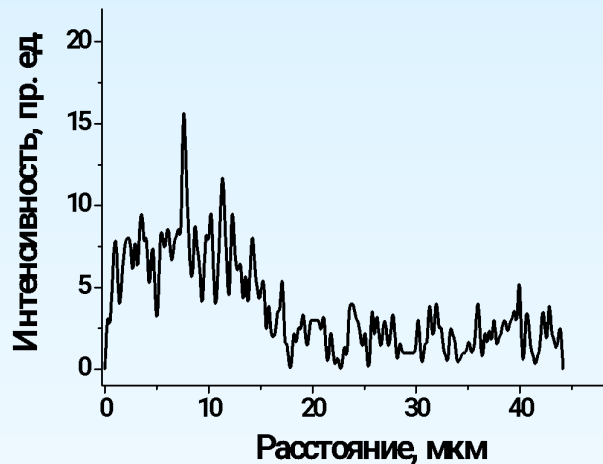


# Элементный состав

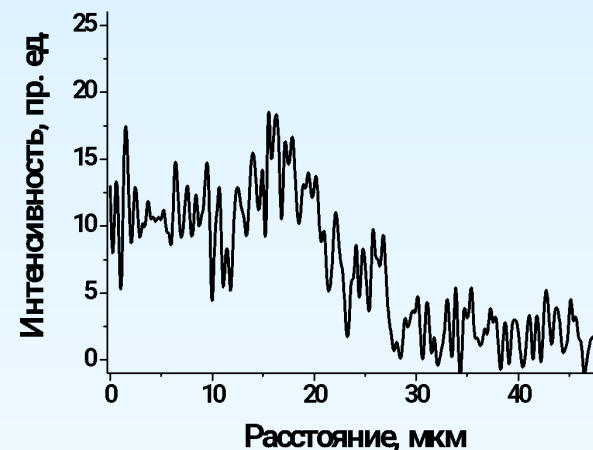
## *Распределение характеристического рентгеновского излучения по глубине*



$E=15 \text{ Дж/см}^2$  (10,2 ат.%Mo)



$E=20 \text{ Дж/см}^2$  (7,8 ат.%Mo)



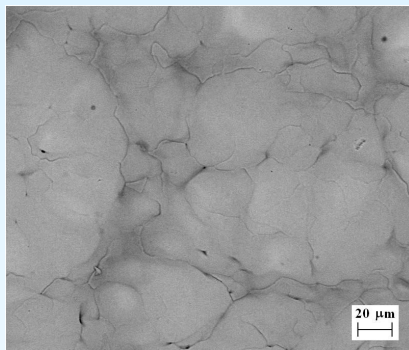
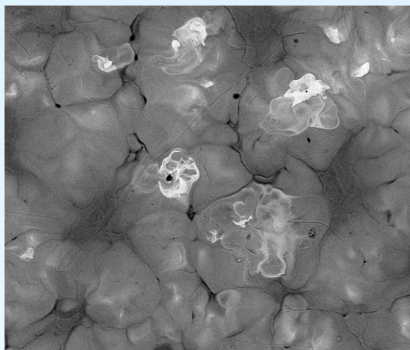
$E=30 \text{ Дж/см}^2$  (3,4 ат.%Mo)

Повышение плотности поглощенной энергии от 15 до 30 Дж/см<sup>2</sup> приводит к увеличению глубины расплавленного слоя, обуславливающее снижение концентрации атомов молибдена.

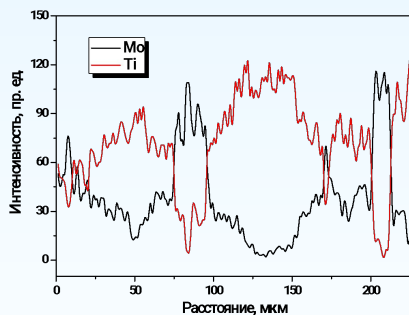


# Морфология поверхности

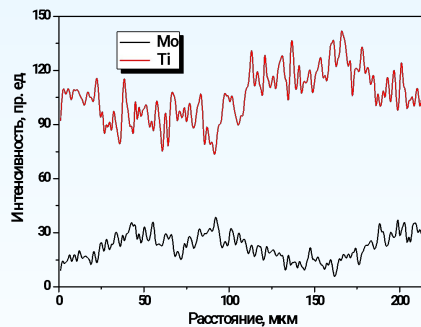
## *Растровая электронная микроскопия*



Обработка с поглощенной энергией  $15 \text{ Дж/см}^2$  приводит к неравномерному распределению атомов молибдена по поверхности. Имеются участки, в которых происходит отслоение покрытия. При поглощенной энергии  $25 \text{ Дж/см}^2$  имеет место равномерно распределение молибдена



$15 \text{ Дж/см}^2$

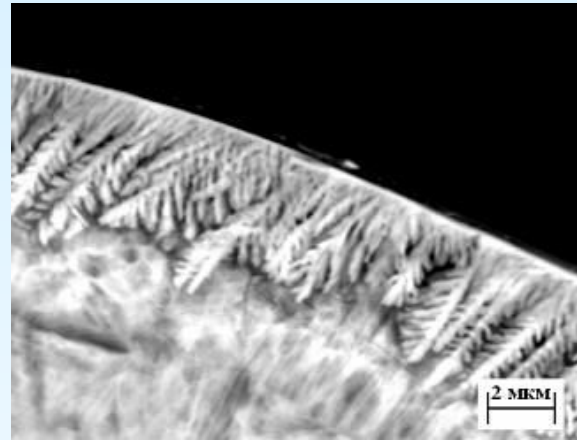
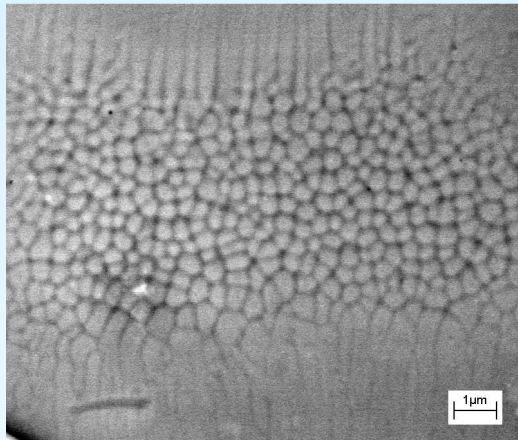


$25 \text{ Дж/см}^2$



# Ячеистая и дендритная структура

---

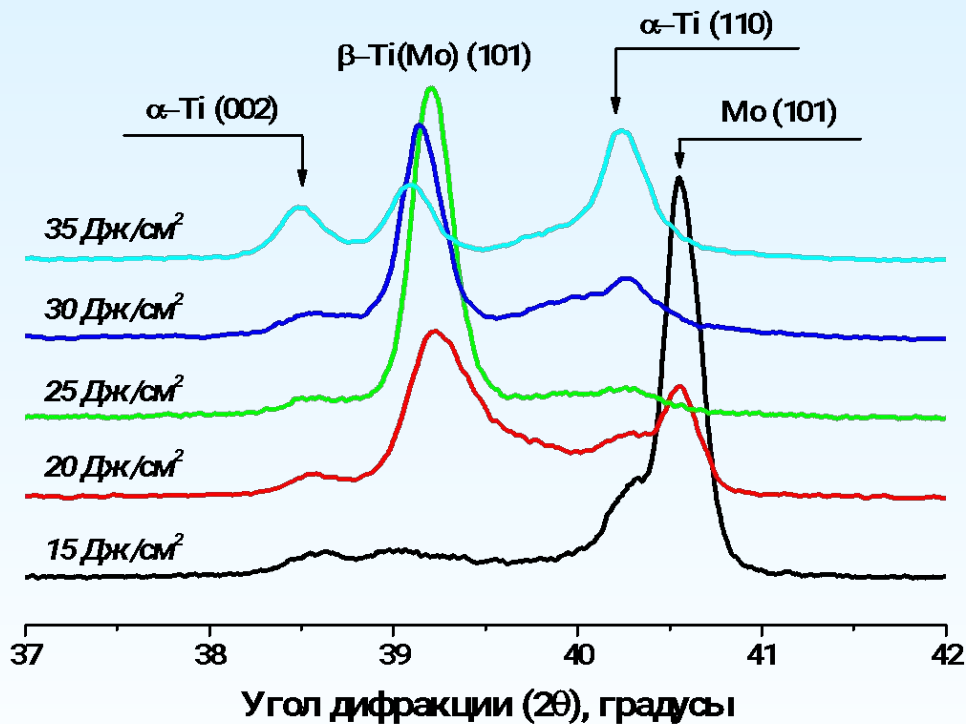


Высокие скорости охлаждения ( $10^6 - 10^7$  К/с) и температурного градиента ( $10^8$  К/с) формируются неустойчивость на границе раздела «расплав/металл», что приводит к формированию гексагональных ячеек (средний размер 300 нм) и дендритных образований 2 – 3 мкм.



# Фазовый состав

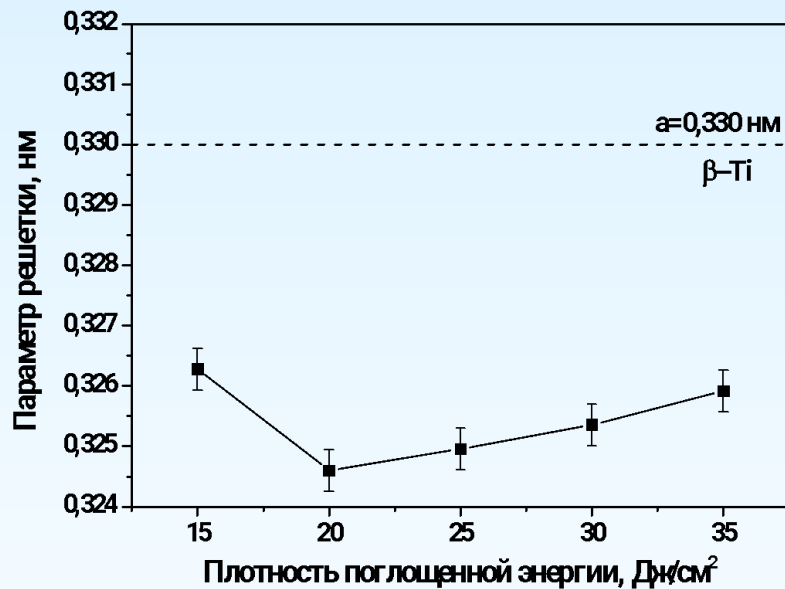
## Рентгеноструктурный анализ



- при энергии 15 – 20 Дж/см<sup>2</sup> имеется нерасплавленный молибден
- при энергии выше 20 Дж/см<sup>2</sup> формируется высокотемпературная β-фаза титана, стабилизированная атомами молибдена (критическая концентрация 5,8 ат.%)
- максимальное содержание β-фазы наблюдается при энергии 25 Дж/см<sup>2</sup>



# Параметр решетки $\beta$ -фазы



Определение параметра решетки для кубической решетки  $\beta$ -фазы:

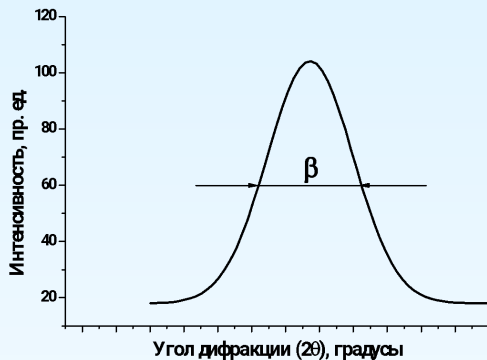
$$a = d_{hkl} \sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)}$$

Параметр решетки меньше равновесного, что обусловлено внедрением атомов молибдена, атомный радиус которых (0,142 нм) меньше, чем у атомов титана (0,146 нм), в результате чего происходит сжатие решетки.



# Микронапряжения в $\alpha$ -фазе

## Метод аппроксимации дифракционных линий (100) и (103)



$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\operatorname{tg}\theta_2}{\operatorname{tg}\theta_1}$$

Уширение линии вызвано только микронапряжениями

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}$$

Уширение линии вызвано только дисперсностью структуры

$$\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} < \frac{\beta_2}{\beta_1} < \frac{\operatorname{tg}\theta_2}{\operatorname{tg}\theta_1}$$

Наличие обоих факторов уширения

$$\frac{\Delta a}{a} = 0.25n_2 \operatorname{ctg}\vartheta_2$$

Определение микронапряжений по высокоугловой линии ( $n_2$  – весовой множитель)

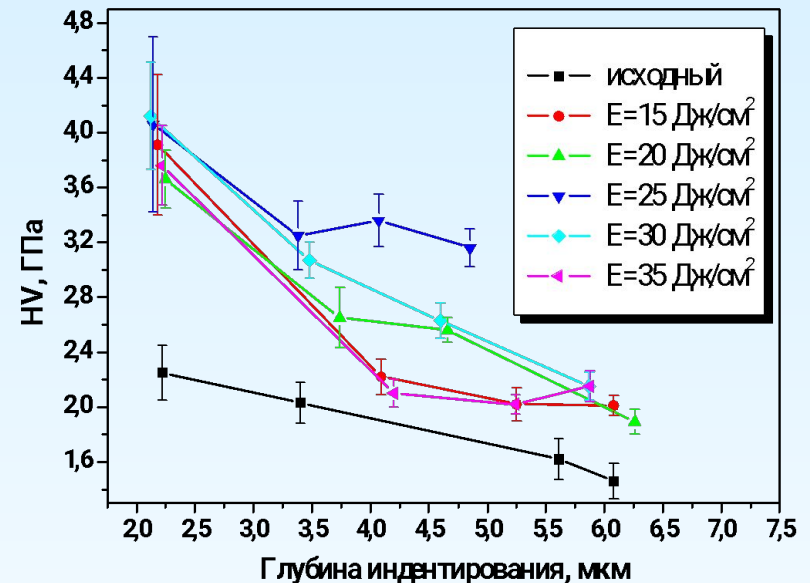
Наличие внутренних микронапряжений 0,3 – 0,5 ГПа обусловлено сопряжением кристаллических решеток  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы титана



# Механические свойства (твердость)

Методика Виккерса измерения микротвердости (твёрдомер ПМТ-3), диапазон нагрузок (P) 50 – 200 г. Твердость в ГПА определяется через диагональ отпечатка (d):

$$H = 1854 \frac{P}{d^2}$$



Максимальное значение твердости достигается в случае обработки 25 Дж/см<sup>2</sup>, при которой формируется максимальное количество высокотемпературной фазы титана. Следовательно, упрочнение поверхностного слоя осуществляется в основном за счет твердорастворного механизма.



# Научная новизна работы

---

Научная новизна полученных результатов заключается в создании глубоких модифицированных слоев, характеризующихся увеличенной в 1,5 – 2 раза твердостью, которая обусловлена стабилизацией высокотемпературной фазы титана атомами молибдена, концентрация которого составляет 7,8 ат.%





## Положения, выносимые на защиту

---

1. Воздействие сильноточных электронных пучков с плотностью энергии  $15 - 35 \text{ Дж/см}^2$  на титан с предварительно нанесенным покрытием молибдена приводит к плавлению поверхностного слоя с последующим его конвективным перемешиванием.
2. Глубина легированного слоя увеличивается от 10 до 30 мкм при повышении плотности энергии, в результате чего концентрация молибдена снижается от 10,2 до 3,4 ат.% и характеризуется равномерным распределением по всей глубине расплавленного слоя.



## Положения, выносимые на защиту

---

3. При плотности энергии выше  $20 \text{ Дж/см}^2$  формируется высокотемпературная  $\beta$ -фаза титана, стабилизированная атомами молибдена, причем максимальное ее количество образуется при плотности энергии  $25 \text{ Дж/см}^2$ .
4. Воздействие сильноточных электронных пучков на системы «молибден/титан» способствует упрочнению модифицированного слоя, что проявляется в увеличении твердости в  $1,5 - 2$  раза за счет формирования высокотемпературной  $\beta$ -фазы титана.



---

Спасибо за внимание

