



# Исследование взаимодействия газовых кластерных ионов с материалами

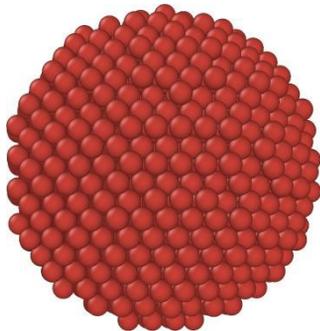
с.н.с лаборатории ионно-пучковых  
нанотехнологий ОФАЯ

**А.В. Назаров**

$\text{Ar}_n, \text{Ne}_n, \text{Kr}_n, \text{Xe}_n$

$n$ : от  $10^0$  до  $10^4$

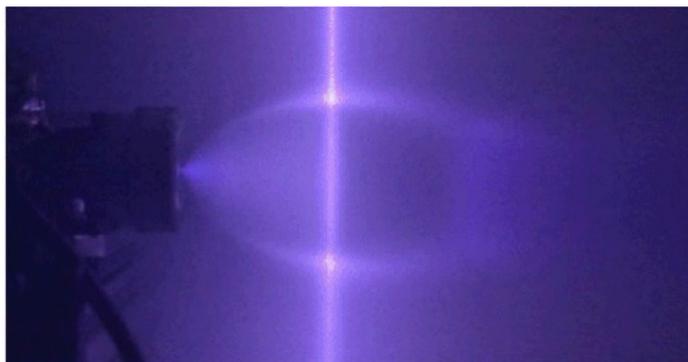
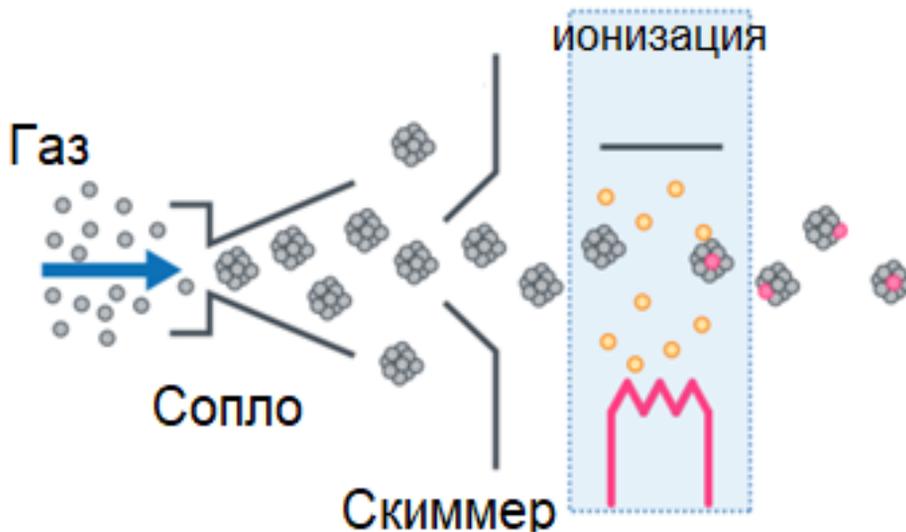
$E_{\text{св}} \sim \text{мэВ/атом}$



- Малая энергия, приходящаяся на один атом в кластере
- Атомы кластера не могут проникнуть глубоко в мишень
- Большое количество сталкивающихся атомов в небольшой области пространства
- Большое количество энергии выделяется в небольшой области пространства. ( $10^4 - 10^5$  К,  $10^{10}$  Па)



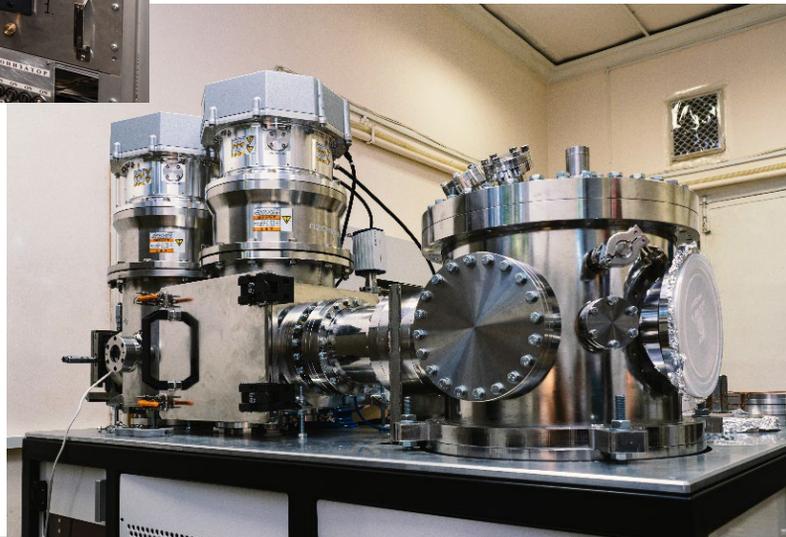
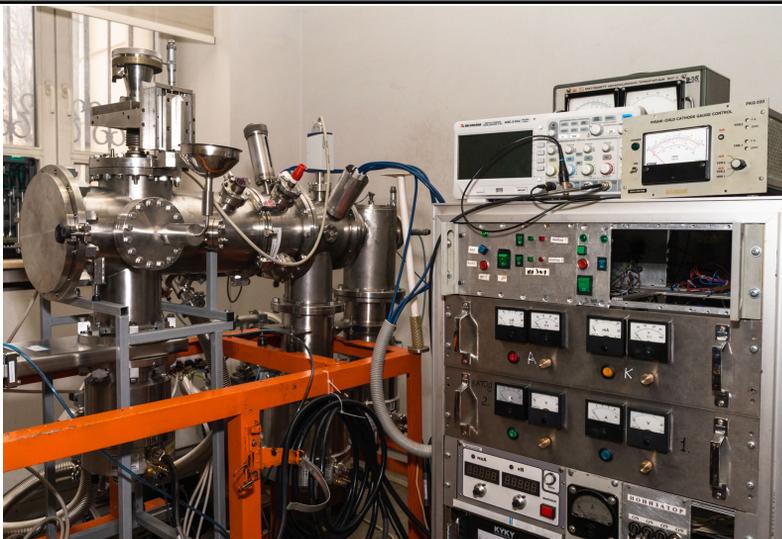
# ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ



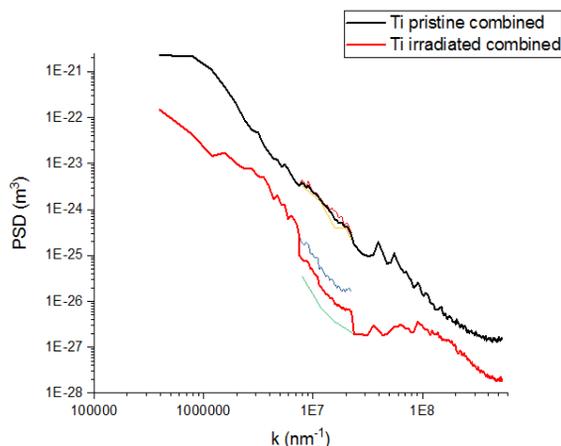
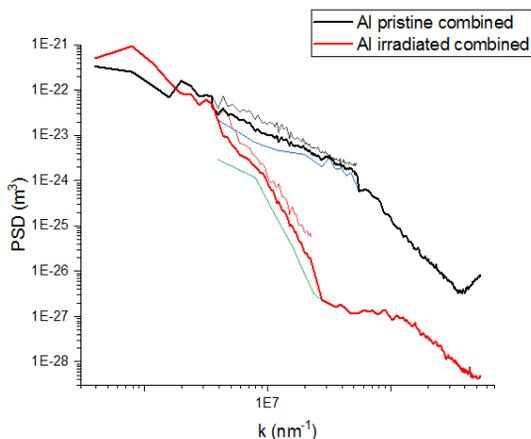
- Экспериментальные исследования взаимодействия газовых кластерных ионов с материалами
  - Фундаментальные исследования механизмов взаимодействия газовых кластерных ионов с поверхностью
  - Исследование модификации топографии поверхности материалов под действием кластерного облучения
- Компьютерное моделирование взаимодействия кластеров с поверхностью твёрдого тела методом молекулярной динамики



# УСКОРИТЕЛИ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ ЛИПНТ



Проводилось облучение аддитивных сплавов  $Al_{10}SiMg$  и  $Ti_6Al_4V$  пучком кластерных ионов  $Ar_n$  с энергией 10 кэВ при нормальном падении пучка и при угле падения  $60^\circ$

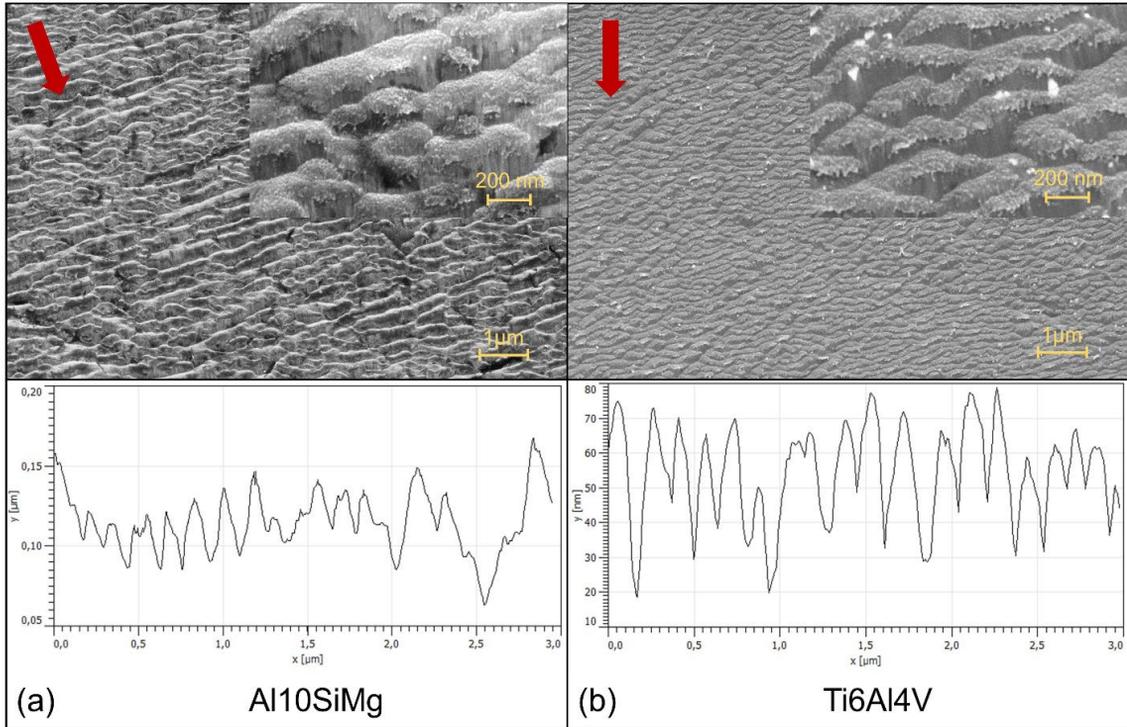


Показана возможность полировки аддитивных сплавов в широком диапазоне пространственных частот при нормальном падении кластерного пучка

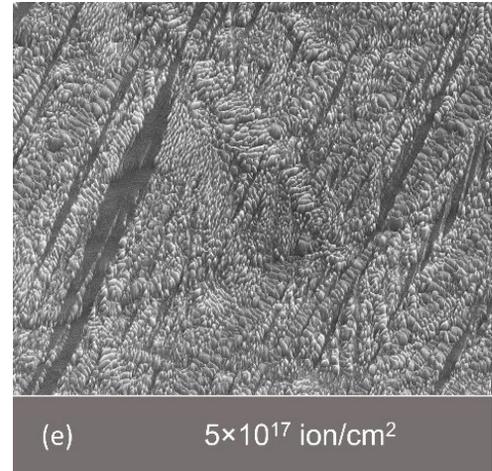
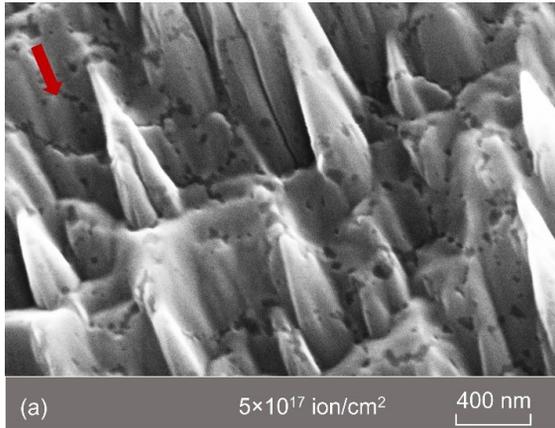


# ОБЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

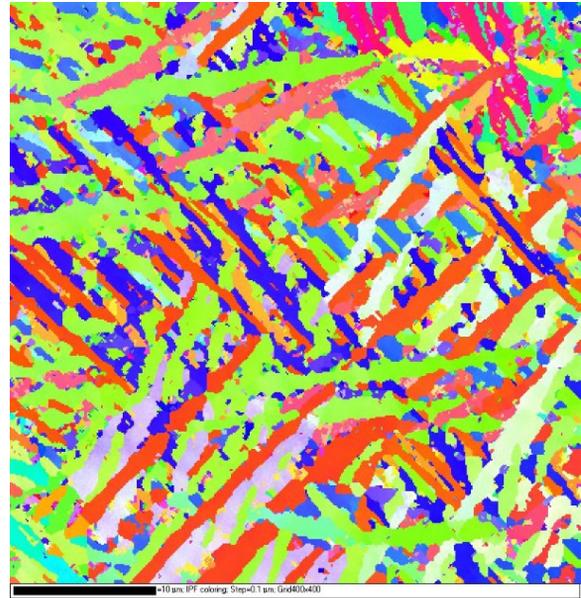
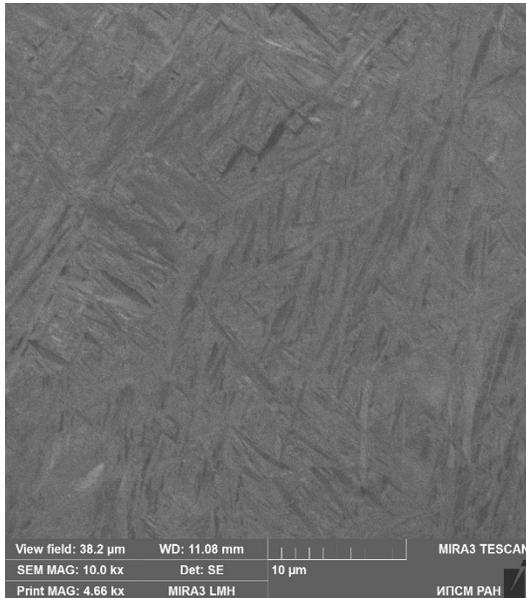
При облучении под углом  $60^\circ$  происходит образование волнообразного рельефа на поверхности

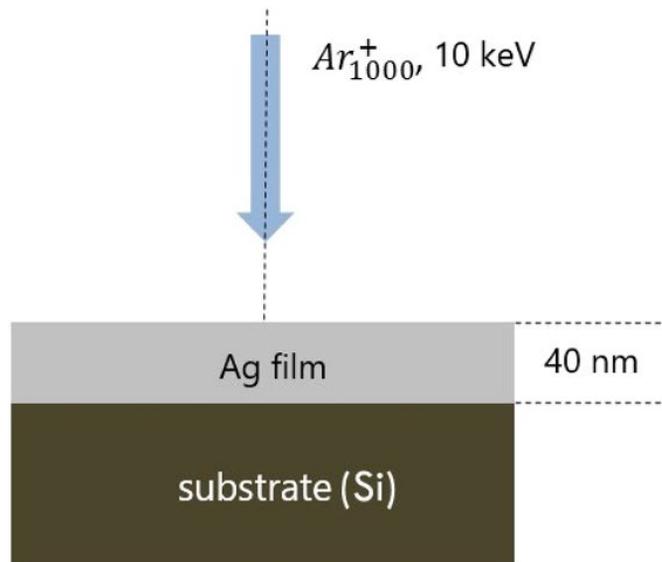


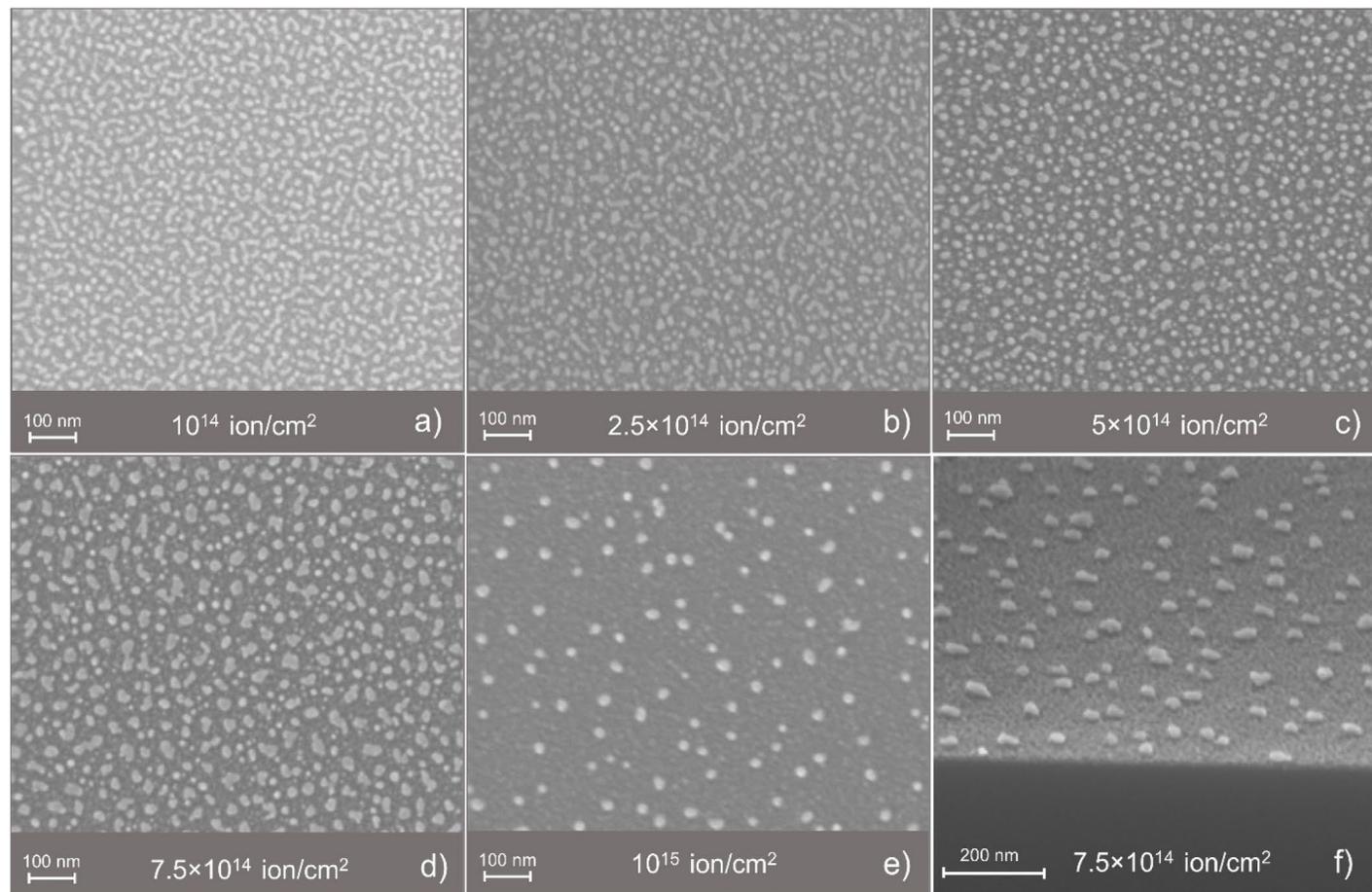
Облучение атомарными 10 кэВ ионами  $Ar^+$  под углом  $60^\circ$

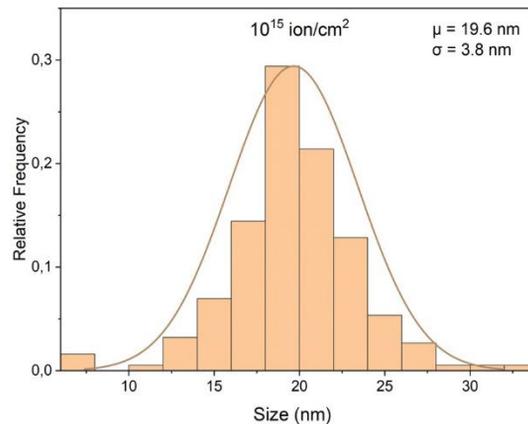
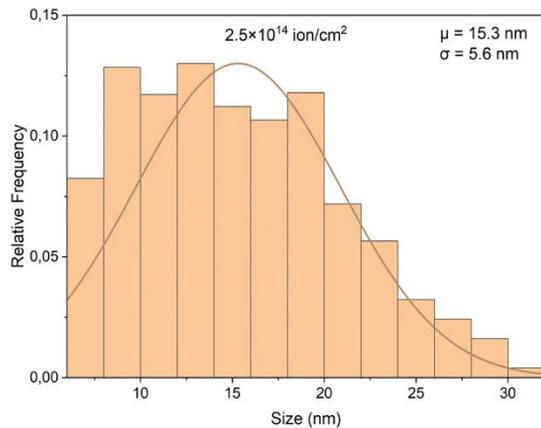


## Структура исходного образца

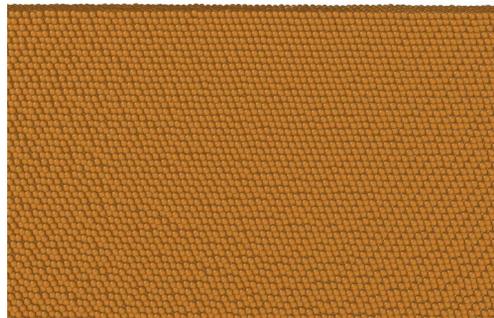
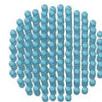




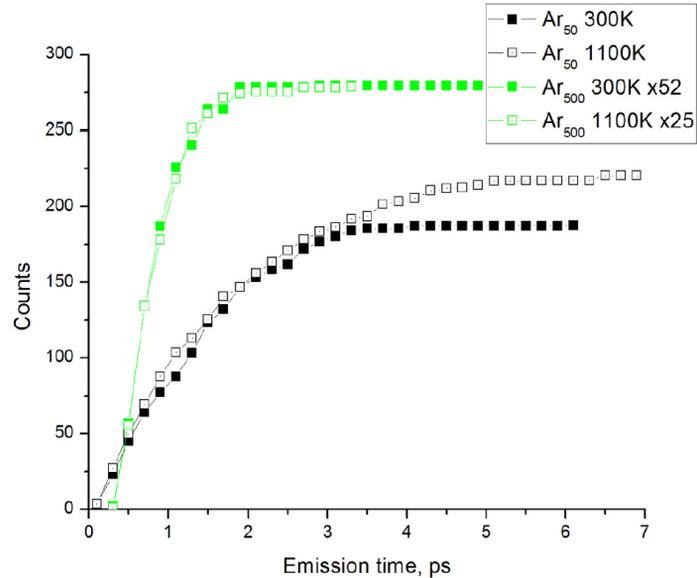
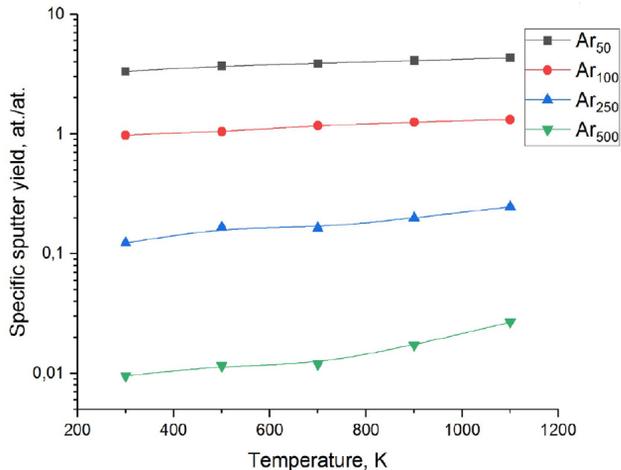
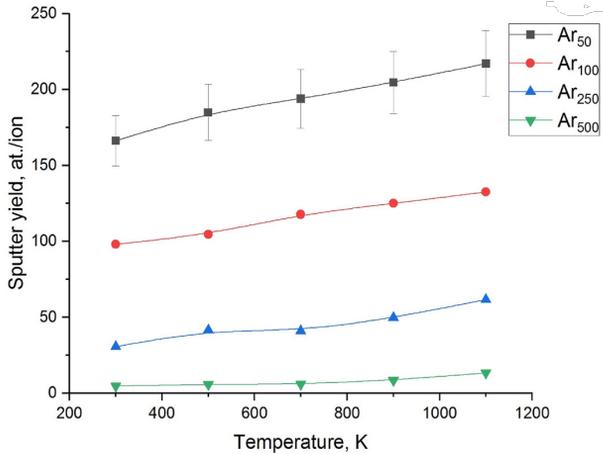




Проводилось МД моделирование распыления меди кластерами аргона размером от 50 до 500 атомов в кластере с энергией 10 кэВ при температурах мишени в диапазоне от 300К до 1000К



# ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛЕНИЯ



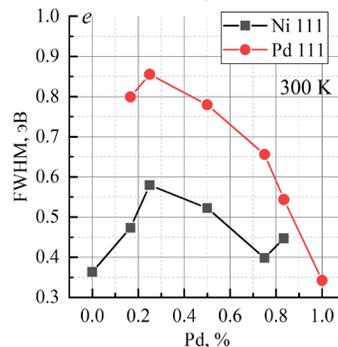
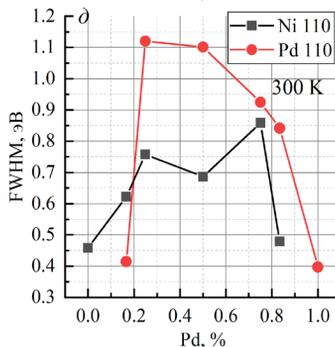
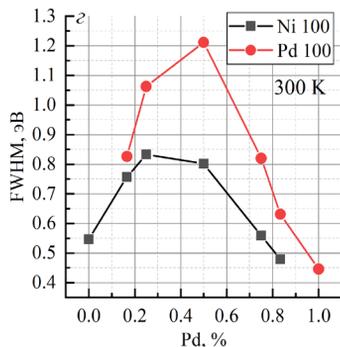
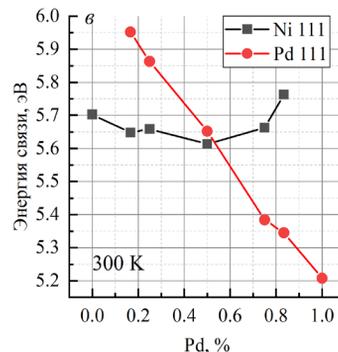
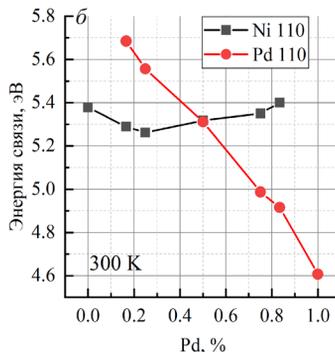
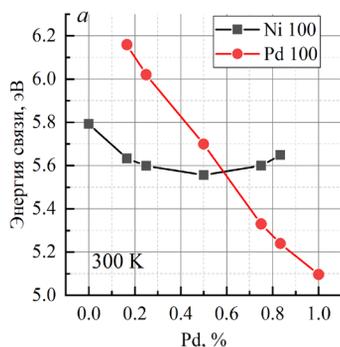
Поверхностная энергия связи  $U_0$  – энергия, необходимая для удаления атома с поверхности на бесконечность.

При распылении многокомпонентных мишеней пучком атомарных ионов (из модели линейных каскадов Зигмунда):

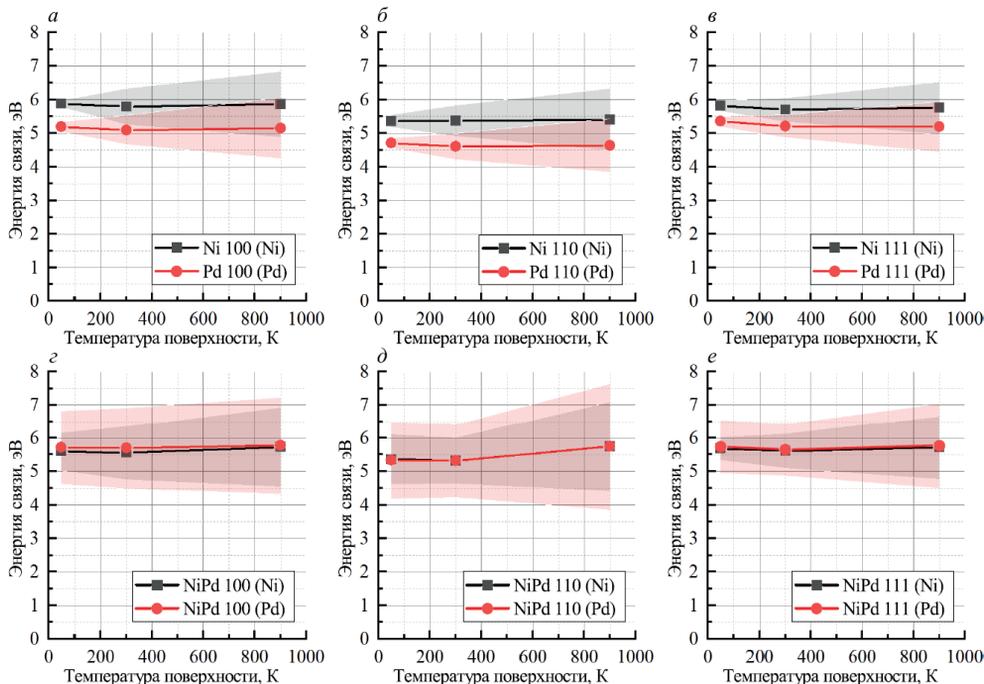
$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{c_1^s}{c_2^s} \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{2m} \left( \frac{U_{02}}{U_{01}} \right)^{1-2m}$$



Зависимости среднего значения энергии связи (а, б, в) и полуширины распределений энергии связи (г, д, е) атомов никеля и палладия в сплавах  $Ni_xPd_y$  от концентрации палладия для различных кристаллографических ориентаций поверхности



Температурные зависимости поверхностной средней энергии связи атомов никеля и палладия на поверхности чистых металлов (а, б, в) и эквиатомного сплава (г, д, е). Закрашенная область отображает полуширину распределений поверхностной энергии СВЯЗИ



- Расчет поверхностной энергии связи атомов в никель-палладиевых сплавах с помощью метода молекулярной динамики / М. С. Шилов, А. В. Назаров, В. С. Черныш, А. А. Шемухин // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.* — 2025. — № 1. — С. 2510302.
- Differential characteristics of the particles sputtered by gas cluster ions at elevated temperatures. molecular dynamics simulation / A. E. Ieshkin, A. V. Nazarov, D. R. Bessmertniy et al. // *Vacuum.* — 2024. — Vol. 222. — P. 113064
- Surface modification of NiTi alloy by ion and gas cluster ion irradiation. the role of chemical segregation / V. S. Chernysh, A. E. Ieshkin, D. S. Kireev et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* — 2024. — Vol. 554. — P. 165463.
- Модификация рельефа поверхности аддитивных материалов при облучении ионами Ar<sup>+</sup> / Д. С. Киреев, К. Ф. Миннебаев, В. А. Киселевский, А. Е. Иешкин // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.* — 2024. — Т. 79, № 4. — С. 2440501–1–2440501–5.



# Спасибо за внимание!

