

## МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА HASTELLOY C-276 ОБЛУЧЕНИЕМ ГАЗОВЫМИ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ

Е.С. Косенюк<sup>1), 2)</sup>, А.В. Назаров<sup>1), 2)</sup>, Д.С. Киреев<sup>2)</sup>, А.А. Татаринцев<sup>2)</sup>, А.В.Лубенченко<sup>3)</sup>,  
О.Н. Павлов<sup>3)</sup>, П.Н. Дегтяренко<sup>4), 5)</sup>

<sup>1)</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,  
Ленинские горы 1/2, Москва 119991, Россия

<sup>2)</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 1/2, Москва 119991, Россия

<sup>3)</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
ул. Красноказарменная 14, Москва 111250, Россия

<sup>4)</sup>ООО «С-Инновации», Научный проезд 20/2, Москва 117246, Россия

<sup>5)</sup>Объединенный институт высоких температур РАН,  
ул. Ижорская 13/2, Москва 125412, Россия  
kosenyukes@my.msu.ru, av.nazarov@physics.msu.ru

Исследование посвящено изучению влияния облучения газовыми кластерными ионами аргона на морфологию и состав поверхности сплава Hastelloy C-276, применяемого в качестве подложки для высокотемпературных сверхпроводящих лент 2-го поколения. Методом атомно-силовой микроскопии показано, что кластерное облучение по нормали к поверхности приводит к сглаживанию рельефа в диапазоне пространственных частот  $10^{-3}$ – $10^{-1}$  нм $^{-1}$ , устраняя перепады высот на границах зерен. В наномасштабе (частоты  $>10^{-1}$  нм $^{-1}$ ) шероховатость несколько возрастает. С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии выявлено значительное обеднение поверхности хромом и молибденом, что привело к увеличению концентрации никеля до 90%. Кроме того, облучение под углом 45° к поверхности сформировало периодический нанорельеф. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования газокластерного облучения для модификации поверхности подложек с целью улучшения качества буферных и сверхпроводящих слоев в ВТСП-лентах.

**Ключевые слова:** газовые кластерные ионы; высокотемпературные сверхпроводящие ленты; модификация поверхности; наноструктурирование; атомно-силовая микроскопия.

## MODIFICATION OF HASTELLOY C-276 SURFACE BY GAS CLUSTER ION IRRADIATION

Elizaveta Kosenyuk<sup>1), 2)</sup>, Anton Nazarov<sup>1), 2)</sup>, Dmitrii Kireev<sup>2)</sup>, Andrey Tatarintsev<sup>2)</sup>,  
Alexander Lubenchenko<sup>3)</sup>, Oleg Pavlov<sup>3)</sup>, Pavel Degtyarenko<sup>4), 5)</sup>

<sup>1)</sup>Lomonosov Moscow State University,  
D.V. Skobeltsyn Scientific Research Institute of Nuclear Physics,  
1/2 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia

<sup>2)</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,  
1/2 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia

<sup>3)</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University «MPEI», 14 Krasnokazarmennaya Str., 111250 Moscow, Russia

<sup>4)</sup>S-Innovations LLC, 20-2 Nauchnyi proezd, 117246 Moscow, Russia

<sup>5)</sup>Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,  
13/2 Izhorskaya Str., 125412 Moscow, Russia,  
kosenyukes@my.msu.ru, av.nazarov@physics.msu.ru

This study investigates the effects of gas cluster ion beam irradiation on the surface morphology and chemical composition of Hastelloy C-276, a nickel-based superalloy widely used as a substrate for second-generation high-temperature superconducting tapes. The research focuses on optimizing the substrate surface to enhance the quality of subsequently deposited buffer and superconducting layers, which are critical for the performance of HTS

tapes. The experiments were conducted using argon cluster ions with an energy of 10 keV and an average cluster size of 1000 atoms, at a fluence of  $10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup>. Irradiation was performed both at normal incidence and at a 45° angle to the surface.

Atomic force microscopy revealed that normal angle irradiation significantly reduces surface roughness in the spatial frequency range of  $10^{-3}$ – $10^{-1}$  nm<sup>-1</sup>, eliminating height variations at grain boundaries. However, at higher frequencies ( $>10^{-1}$  nm<sup>-1</sup>), a slight increase in nanoscale roughness was observed without altering the overall surface morphology. X-ray photoelectron spectroscopy analysis demonstrated a substantial depletion of chromium and molybdenum from the surface, resulting in a nickel-enriched layer with over 90% Ni content.

Notably, sliding angle (45°) irradiation induced the formation of a periodic nanoscale ripple pattern, with an average period of 41.5 nm and a height modulation of up to 7 nm. This nanostructuring effect could potentially be utilized to engineer surface topography for improved epitaxial growth of functional layers. The findings highlight the potential of cluster ion beam processing as a versatile tool for surface modification of metallic substrates in superconducting tape manufacturing, offering control over both topography and composition.

**Keywords:** gas cluster ion beams; high-temperature superconducting tapes; surface modification; nanostructuring; AFM.

## Введение

Сплав Hastelloy C-276 относится к категории никелевых суперсплавов, отличающихся высокой прочностью, коррозионной стойкостью и жаропрочностью, из-за чего их применяют при работе в экстремальных условиях. Указанный сплав используется в производстве высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) ленты 2-го поколения, в которой выступает в качестве подложки. Такая лента представляет собой металлическую подложку, буферный слой и слой сверхпроводника второго рода, покрываемого защитными слоями серебра и меди. Буферный слой предотвращает взаимодействия сверхпроводящего слоя с материалом подложки. Морфология поверхности подложки и осаждаемого буферного слоя определяет качество сверхпроводящего слоя [1, 2]. Путем облучения кластерными ионами можно производить сглаживание поверхности и модификацию состава поверхности [3, 4], что может позволить улучшить качество буферного слоя.

## Материалы и методы исследования

В качестве мишени использовалась промышленная лента из сплава Hastelloy C-276 толщиной 40 мкм и шириной 12 мм. Размер облучаемых образцов составлял 12x12 мм. Образцы прошли предварительную электрохимическую полировку. Облучение проводилось на ускорителе газовых кластерных ионов МГУ им. М.В.

Ломоносова [5] пучком кластерных ионов аргона с энергией 10 кэВ и средним размером 1000 атомов. Флюенс облучения составлял  $10^{16}$  ионов/см<sup>2</sup>. Облучение выполнялось по нормали и под углом 45° к поверхности.

Топография поверхности до и после облучения была исследована методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Измерения проводились в полуконтактном режиме. Анализ изменения состава поверхностных слоев сплава проводился с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

## Облучение по нормали

Поверхность образцов была уже достаточно гладкой после электрохимической полировки, однако на ней оставались неоднородности, связанные с границами зерен.

На рисунке 1 представлены изображения АСМ поверхности сплава до и после облучения пучком газовых кластерных ионов. Границы зерен, заметные на необработанной поверхности, значительно сглаживаются после воздействия кластерных ионов аргона.

Среднеквадратичная шероховатость необлученного образца составила 2.9 нм для области сканирования 10x10 мкм и 0.25 нм для области 1x1 мкм. Кластерное облучение позволило значительно сгладить рельеф поверхности в диапазоне пространственных частот от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$

нм<sup>-1</sup>. При этом в области пространственных частот свыше 10<sup>-1</sup> нм<sup>-1</sup> наблюдается увеличение шероховатости, но качественного изменения морфологии поверхности на этом масштабе не происходит.

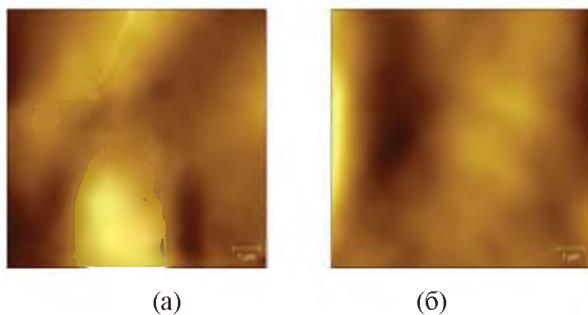


Рис. 1. ACM изображение поверхности электрополированного сплава а) до и б) после облучения кластерными ионами аргона. Размер области сканирования составляет 10x10 мкм

Анализ методом РФЭС показал, что обработка кластерными ионами привела к обеднению поверхности хромом и молибденом, более 90% стал составлять никель. Фазовый состав не претерпел значительных изменений.

### Облучение под углом 45°

При скользящем угле облучения на поверхности формируется периодический нанорельеф с волнами со средним периодом 41,5 нм и перепадом высоты 7 нм, перпендикулярными направлению проекции направления пучка на поверхность. Снимок ACM полученного нанорельефа представлен на рис. 2.

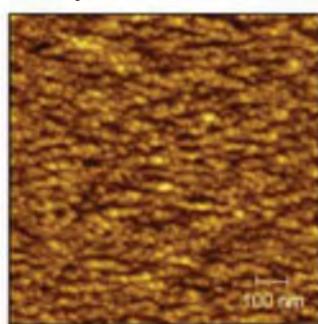


Рис. 2. ACM изображение поверхности сплава, облученного кластерными ионами аргона под углом 45°

### Заключение

Проведенное исследование демонстрирует потенциал газовых кластерных ионов для модификации поверхности никелевых сперсплавов.

Облучение по нормали эффективно сглаживает рельеф, устранивая неоднородности, и позволяет достичнуть значительной степени однородности состава поверхности.

Облучение под углом 45° позволяет производить наноструктурирование. Таким образом можно контролировать рельеф буферного слоя, который наследует рельеф подложки, а также повышать прочность ВТСП ленты за счет улучшения адгезии буферного слоя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-79-00125.

### Библиографические ссылки

1. Самойленков С.В., Кучаев А.И., Иванов С.С., Кауль А.Р. Ленты на основе высокотемпературных сверхпроводников: технологии и перспективные применения. *Альтернативная энергетика и экология* 2011; (10): 140-148.
2. Hilgenkamp H., Mammhart J. Superconducting and normal-state properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>-bicrystal grain boundary junctions in thin films. *Applied Physics Letters* 1998; 73(2): 265.
3. Иешкин А.Е., Кушкина К.Д., Киреев Д.С., Ермаков Ю.А., Черныш В.С. Полировка поверхности сверхтвердых материалов пучками газовых кластерных ионов. *Письма в Журнал технической физики* 2017; 43(2): 18-23.
4. Ieshkin A.E., Kireev D.S., Chernysh V.S., Molchanov A.V., Serebryakov A.E., Chirkin M.V. Decomposition of AFM images of ultrasMOOTH optical surface polished with gas cluster ion beam. *Surface Topography: Metrology and Properties* 2019; 7(2): 02501.
5. Андреев А.А., Ермаков Ю.А., Иешкин А.Е., Патракеев А.С., Черныш В.С. Ускоритель газовых кластерных ионов. *Нанотехнологии: разработка, применение-XXI век* 2011; 3(2): 3-11.