

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра физики твердого тела и нанотехнологий**

УДК 538.9

**КОРХОВ**  
Александр Андреевич

**ТЕРМОДЕСОРБЦИЯ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМОВЫХ  
СПЛАВАХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПРЕССИОННЫМИ  
ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ.**

Дипломная работа

Научный руководитель:  
кандидат физ.-мат. наук,  
доцент, Шиманский В.И.

«Допустить к защите»

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Зав. кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент  
В.И.Шиманский

Минск, 2026

# БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет

Кафедра физики твердого тела и  
нанотехнологий

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

## ЗАДАНИЕ

по подготовке дипломной работы  
Студенту 6 курса Корхову Александру Андреевичу

1. Тема работы Термодесорбция дейтерия в вольфрамовых сплавах, модифицированных компрессионными плазменными потоками.

2. Срок сдачи студентом законченной работы. 20 декабря 2025 г.

Промежуточный отчет по дипломной работе: 24 ноября 2025 г.

3. Исходные данные к работе.

1. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В.В. Углов [и др.]. – Мн.: БГУ, 2013. – 248 с.

2. V.I. Shymanski, V.V. Uglov, N.N. Cherenda et al. Structure and phase composition of tungsten alloys modified by compression plasma flows and high-intense pulsed ion beam impacts / Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 491. – P. 43-52.

3. V.I. Shymanski, N.N. Cherenda, V.V. Uglov et al. Structure and phase composition of Nb/Ti system subjected to compression plasma flows impact / Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 278. – P. 183-189.

4. З.Р. Арутюнян, Ю.М. Гаспарян, В.С. Ефимов и др. Удержание дейтерия в поверхностном слое вольфрама, предварительно облученном ионами гелия // Известия РАН. Серия Физическая. – 2020. – Т. 84, № 6. – С. 882-886.

5. Z. Harutyunyan et al. Deuterium trapping in the subsurface layer of tungsten pre-irradiated with helium ions // Journal of Nuclear Materials. – 2021. – Vol. 548. – P. 152848.

6. Z. Harutyunyan et al. Tungsten fuzz annealing effect on deuterium retention in polycrystalline tungsten // Journal of Nuclear Materials. – 2022. – Vol. 567. – P. 153811.

4. Перечень подлежащих разработке вопросов.

Обзорная часть.

4.1. Структура, физико-химические свойства и области практического использования вольфрама и его основных сплавов.

4.2. Перспективы использования вольфрама в качестве материала первой стенки термоядерного реактора.

4.3. Взаимодействие вольфрама с гелием и дейтерием в процессе эксплуатации термоядерного реактора. Радиационные эффекты, связанные с накоплением гелия и дейтерия.

4.4. Использование импульсных потоков энергии для модифицирования структурно-фазового состояния поверхностных слоев металлов и сплавов. Принципы формирования компрессионных плазменных потоков.

4.5. Термодесорбционные эксперименты по накоплению гелия и дейтерия.

Объекты и методы исследования.

4.6. Описание объекта исследования, его химический состав, методы формирования покрытий и параметры плазменной обработки.

4.7.

4.8. Краткий анализ методик исследования структуры и фазового состава твердых тел: растровая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, рентгеноструктурный анализ.

Обсуждение результатов исследования.

4.9. Структура вольфрама, модифицированного компрессионными плазменными потоками. Исследование особенностей морфологии поверхности, элементного состава, контроль фазового состава.

4.10. Изучение структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях вольфрама, легированных атомами меди и ниобия (в том числе и совместно) при воздействии компрессионных плазменных потоков. Определение характера пространственного распределения элементов. Влияние легирующих элементов на фазовый состав модифицированных слоев.

4.11. Анализ термодесорбционных спектров вольфрама при его насыщении гелием или дейтерием. Анализ механизмов накопления гелия или дейтерия в структуре вольфрама, модифицированного плазменным воздействием.

Выводы по работе.

Дата выдачи задания «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Руководитель, заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Шиманский В.И.

Задание принял к исполнению «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Студент 6 курса \_\_\_\_\_ Корхов А.А.

## Оглавление

Реферат.....	5
Введение .....	8
Глава 1. Актуальность и цель работы .....	9
1.1 Общие свойства вольфрама .....	9
1.2 Общие сведения о термоядерном синтезе .....	10
1.3 Преимущества и недостатки термоядерного синтеза.....	11
1.4 Накопление дейтерия в дефектах вольфрамовых сплавов.....	12
1.4.1 Высвобождение дейтерия из вакансий, вакансионных кластеров и пустот.....	13
1.4.2 Высвобождение дейтерия из мелких пузырьков гелия .....	13
1.4.3 Влияние отжига вольфрамовых сплавов на удержание и высвобождение дейтерия...14	
1.5 Метод термодесорбционной спектроскопии (ТДС) в исследовании удержания водорода .....	15
1.5.1 Физические основы и экспериментальная методика.....	15
1.5.2 Кинетика термодесорбции и математические модели анализа спектров .....	16
1.5.3. Интерпретация ТДС-спектров для вольфрама .....	17
1.6 Плазменное воздействие и его влияние на свойства материалов.....	17
Глава 2 Описание метода облучения компрессионными плазменными потоками.....	19
2.1 Компрессионные плазменные потоки.....	19
2.2 Описание эксперимента .....	19
2.3 Метод рентгеноструктурного анализа .....	20
2.4 Сканирующая электронная микроскопия .....	22
2.5 Метод рентгеноспектрального микроанализа .....	23
Глава 3. Структурное состояние вольфрамовых сплавов .....	24
3.1 Структурное состояние исходных образцов вольфрама .....	24
3.2 Структурное состояние образцов вольфрама, облучённых компрессионными плазменными потоками .....	26
3.3 Структурное состояние образцов вольфрама, легированных медью.....	27
3.4 Структурное состояние сплавов вольфрама, легированных медью и ниобием.....	30
3.5 Результаты термодесорбции сплавов.....	33
3.6 Анализ данных, полученных из программы SRIM.....	36
Заключение .....	38
Список используемой литературы .....	38

## Реферат

Дипломная работа: 38 с., 17 рис., 7 табл., 27 ист.

**ВОЛЬФРАМ, МЕДЬ, НИОБИЙ, ТЕРМОДЕСОРБЦИЯ, ДЕЙТЕРИЙ, КОМПРЕССИОННЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПОТОКИ.**

Объект исследования – необработанный вольфрам, модифицированный вольфрам, сплавы вольфрама с нанесёнными покрытиями Nb, Nb-Cu, модифицированные компрессионными плазменными потоками (КПП).

Предмет исследования – термодесорбция дейтерия из вольфрама, легированного медью или системой медь-ниобий.

Цель работы – изучение влияния легирующих элементов на термодесорбцию дейтерия из вольфрамовых сплавов.

Методы исследования: растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, рентгеноспектральный микроанализ, оптическая микроскопия, термодесорбционная спектроскопия.

Полученные результаты – в результате воздействия компрессионных плазменных потоков  $Q=55-65$  Дж/см<sup>2</sup> были сформированы сплавы W- Nb и W-Nb-Cu, в результате плавления поверхностного слоя вольфрама и соответствующих покрытий, предварительно нанесённых при помощи вакуумно-дугового осаждения.

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, образования твёрдых растворов не наблюдается ни на одном из легированных образцов. По результатам оптической и сканирующей электронной микроскопии можно сделать вывод о том, что на поверхности фазы легирующих элементов присутствуют в виде отдельных фаз, а не смешиваются в матрице вольфрама. Согласно результатам оптической и сканирующей электронной микроскопии было принято, что при облучении КПП образец растрескивается вследствие большой скорости движения кристаллизационного фронта. Судя по спектрам термодесорбции, выясняется, что легирующие элементы оказывают значительное влияние на накопление и высвобождение дейтерия из «ловушек».

Практическое применение – область радиационного материаловедения, связанная с разработкой первой стенки термоядерных реакторов, материалами дивертора и других элементов, требующих повышенную радиационную стойкость.

## Рэферат

Дыпломная работа: 38 старонак, 17 малюнкаў, 7 табліц, 27 спасылак  
ВАЛЬФРАМ, МЕДЗЬ, НІЁБІЙ, ТЭРМАДЭСОРПЦЫЯ, ДЭЙТЭРЫЙ,  
КАМПРЭСІЙНЫЯ ПЛАЗМЕННЫЯ ПАТОКІ.

Аб'ект даследавання – непрацаваны вальфрам, мадыфікаваны вальфрам, вальфрамавыя сплавы з Nb, пакрыцці з Nb-Cu, мадыфікаваныя кампрэсійнымі плазменнымі патокамі (КПП).

Прадметам даследавання з'яўляецца тэрмадэсорбцыя дэйтэрыю з вольфраму, легіраванага меддзю, або з медна-ніёбіявай сістэмы.

Мэта работы — вывучыць уплыў легіруючых элементаў на тэрмадэсорбцыю дэйтэрыя з вальфрамавых сплаваў.

Метады даследавання: сканавая электронная мікраскапія, рэнтгенаўскі структурны аналіз, рэнтгенаўскі мікрааналіз, аптычная мікраскапія, тэрмадэсорбцыйная спектраскапія.

Атрыманыя вынікі: у выніку ўздзеяння кампрэсійнымі плазменнымі патокамі пры  $Q=55-65$  Дж/см<sup>2</sup> утварыліся сплавы W-Nb і W-Nb-Cu у выніку плаўлення паверхневага слоя вольфраму і адпаведных пакрыццяў, якія былі раней нанесены метадам вакуумна-дугавага нанясення.

Паводле вынікаў рэнтгенаўскага структурнага аналізу, у ніводным з легіраваных узораў не назіралася цвёрдых раствораў. На падставе вынікаў аптычнай і сканавальнай электроннай мікраскапіі можна зрабіць выснову, што легіруючыя элементы прысутнічаюць на паверхні ў выглядзе асобных фаз і не змешваюцца з матрыцай вальфрама.

Згодна з вынікамі аптычнай і сканавальнай электроннай мікраскапіі, было выказана здагадка, што пры апраменьванні КПП узору, трэскаецца з-за высокай хуткасці фронту крышталізацыі. Мяркуючы па спектрах тэрмадэсорбцыі, відавочна, што легіруючыя элементы аказваюць значны ўплыў на назапашванне і вылучэнне дэйтэрыю з «пастак».

Практычнае прымяненне – вобласць радыяцыйнага матэрыялазнаўства, звязаная з распрацоўкай першай сценкі тэрмадзерных рэактараў, матэрыялаў для дывертараў і іншых элементаў, якія патрабуюць павышанай радыяцыйнай устойлівасці.

## Abstract

Graduate work: 38 pages, 17 figures, 7 tables, 27 references.

TUNGSTEN, COPPER, NIOBIUM, THERMODESORPTION, DEUTERIUM, COMPRESSION PLASMA FLOWS.

The object of research is unprocessed tungsten, modified tungsten, tungsten alloys with Nb, Nb-Cu coatings, modified by compression plasma flows (CPF).

The subject of the study is the thermodesorption of deuterium from tungsten alloyed with copper or a copper-niobium system.

The aim of the work is to study the influence of alloying elements on the thermodesorption of deuterium from tungsten alloys.

Research methods: scanning electron microscopy, X-ray structural analysis, X-ray microanalysis, optical microscopy, thermodesorption spectroscopy.

Results obtained: as a result of exposure to compression plasma flows  $Q = 55 - 65 \text{ J/cm}^2$ , W-Nb and W-Nb-Cu alloys were formed as a result of melting of the surface layer of tungsten and corresponding coatings previously applied by vacuum arc deposition.

According to the results of X-ray structural analysis, no solid solutions were observed in any of the alloyed samples. Based on the results of optical and scanning electron microscopy, it can be concluded that the alloying elements are present on the surface in the form of separate phases and do not mix in the tungsten matrix. According to the results of optical and scanning electron microscopy, it was assumed that when irradiated with CPF, the sample cracks due to the high speed of the crystallization front. Judging by the thermodesorption spectra, it turns out that the alloying elements have a significant effect on the accumulation and release of deuterium from “traps”.

Practical application – the field of radiation materials science related to the development of the first wall of thermonuclear reactors, divertor materials, and other elements requiring increased radiation resistance.