

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра физики твердого тела и нанотехнологий**

**КОНДРУСЬ**  
Илья Васильевич

**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДИБОРИДОВ**  
**ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ КОМПРЕССИОННЫМИ**  
**ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ**

Дипломная работа

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
профессор В. В. Углов

Допущен к защите

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Зав. кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий

\_\_\_\_\_ В. И. Шиманский

кандидат физико-математических наук, доцент

Минск, 2026

## РЕФЕРАТ

Дипломная работа 103 с., 39 рис., 5 табл., 56 источника.

Ключевые слова: ДИБОРИДЫ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ, КОМПРЕССИОННЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПОТОКИ (КПП), СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ, ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ.

Объект исследования – поверхностные слои объемных керамических образцов диборидов тугоплавких металлов: ниобия ( $\text{NbB}_2$ ) и тантала ( $\text{TaB}_2$ ).

Предмет исследования – влияние обработки компрессионными плазменными потоками (КПП) на структурно-фазовое состояние, элементный состав, морфологию поверхности, микротвердость и остаточные макронапряжения в поверхностных слоях диборидов  $\text{NbB}_2$  и  $\text{TaB}_2$ .

Цель работы – исследовать влияние обработки компрессионно-плазменными потоками на структурно-фазовый состав и физико-механические свойства поверхностных слоев диборидов тугоплавких металлов  $\text{NbB}_2$  и  $\text{TaB}_2$ .

В процессе работы были решены следующие задачи: проведен аналитический обзор литературы в области сверхвысокотемпературной керамики (СВТК) и методов ее модификации; синтезированы порошки и методом искрового плазменного спекания (SPS) получены объемные образцы диборидов; проведена обработка поверхности образцов компрессионными плазменными потоками на установке с магнитоплазменным компрессором компактной геометрии; исследован фазовый и элементный состав образцов методами РФА/РСА и ЭДС; изучена морфология поверхности методами СЭМ и АСМ; измерены микротвердость и остаточные макронапряжения до и после обработки; проведен сравнительный анализ полученных результатов и установлены эффекты воздействия КПП.

Областью возможного практического применения является разработка технологий поверхностного упрочнения и модификации изделий из сверхвысокотемпературной керамики для использования в экстремальных условиях аэрокосмической, энергетической и металлургической отраслей.

## РЭФЕРАТ

Дыпломная работа 103 с., 39 мал., 5 табл., 56 крыніц.

Ключавыя словы: ДЫБАРЫДЫ ТУГАПЛАЎКІХ МЕТАЛАЎ, КАМПРЭСІЙНЫЯ ПЛАЗМЕННЫЯ ПАТОЧКІ (КПП), СТРУКТУРНА-ФАЗАВЫЯ ПЕРАТВАРЭННІ, ПАВЕРХНЕВАЯ МАДЫФІКАЦЫЯ.

Аб'ект даследавання - павярхоўныя пласты аб'ёмных керамічных узораў дыбарыдаў тугаплаўкіх металаў: ніёбія ( $\text{NbB}_2$ ) і тантала ( $\text{TaB}_2$ ).

Прадмет даследавання - уплыў апрацоўкі кампрэсійнымі плазменнымі патокамі (КПП) на структурна-фазавы стан, элементны склад, марфалогію паверхні, мікрацвёрдасць і рэшткавыя макранапружання ў паверхневых пластах дыбарыдаў  $\text{NbB}_2$  і  $\text{TaB}_2$ .

Мэта працы - даследаваць уплыў апрацоўкі кампрэсійнымі-плазменнымі патокамі на структурна-фазавы склад і фізіка-механічныя ўласцівасці паверхневых пластоў дыбарыдаў тугаплаўкіх металаў  $\text{NbB}_2$  і  $\text{TaB}_2$ .

У працэсе работы былі вырашаны наступныя задачы: праведзены аналітычны агляд літаратуры ў галіне звышвысокатэмпературнай керамікі (СВТК) і метадаў яе мадыфікацыі; сінтэзаваны парашкі і метадам іскрового плазменнага спякання (SPS) атрыманы аб'ёмныя ўзоры дыбарыдаў; праведзена апрацоўка паверхні ўзораў кампрэсійнымі плазменнымі патокамі на ўстаноўцы з магнітаплазменным кампрэсарам кампактнай геаметрыі; даследаваны фазавы і элементны склад узораў метадамі РФА/РСА і ЭРС; вивучана марфалогія паверхні метадамі СЭМ і АСМ; вымераны мікрацвёрдасць і рэшткавыя макранапружання да і пасля апрацоўкі; праведзены параўнальны аналіз атрыманых вынікаў і ўстаноўлены эфекты ўздзеяння КПП.

Вобласцю магчымага практычнага прымянення з'яўляецца распрацоўка тэхналогій паверхневага ўмацавання і мадыфікацыі вырабаў са звышвысокатэмпературнай керамікі для выкарыстання ў экстрэмальных умовах аэракасічнай, энергетычнай і металургічнай галін.

## ABSTRACT

Thesis 103 pages, 39 figures, 5 tables, 56 references.

Keywords: REFRACTORY METAL DIBORIDES, COMPRESSION PLASMA FLOWS (CPF), STRUCTURAL PHASE TRANSFORMATIONS, SURFACE MODIFICATION.

Object of study: surface layers of bulk ceramic specimens of refractory metal diborides: niobium ( $\text{NbB}_2$ ) and tantalum ( $\text{TaB}_2$ ).

Subject of study: The effect of compression plasma flow (CPF) treatment on the structural phase state, elemental composition, surface morphology, microhardness, and residual macrostresses in the surface layers of  $\text{NbB}_2$  and  $\text{TaB}_2$  diborides.

The objective of this study was to investigate the effect of compression plasma treatment on the structural and phase composition and physical and mechanical properties of the surface layers of refractory metal diborides  $\text{NbB}_2$  and  $\text{TaB}_2$ .

The following objectives were addressed: an analytical review of the literature on ultra-high-temperature ceramics (UHTC) and its modification methods was conducted; powders were synthesized and bulk diboride samples were produced using spark plasma sintering (SPS); the surface of the samples was treated with compression plasma flows using a compact-geometry magnetoplasma compressor; the phase and elemental composition of the samples was studied using X-ray diffraction/XRD and EDS; the surface morphology was examined using SEM and AFM; microhardness and residual macrostresses were measured before and after treatment; a comparative analysis of the obtained results was conducted, and the effects of SPS treatment were determined.

The area of potential practical application is the development of technologies for surface hardening and modification of products made of ultra-high-temperature ceramics for use in extreme conditions in the aerospace, energy and metallurgical industries.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>7</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>8</b>
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО СВЕРХВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКЕ .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Сверхвысокотемпературная керамика: состав, структура, свойства и области применения .....</b>	<b>14</b>
1.1.1 Влияние химической связи и состава на термофизические и физико- механические свойства СВТК .....	16
1.1.2 Высокотемпературное окислительное поведение карбидов, нитридов и диборидов переходных металлов: сравнительный анализ .....	22
1.1.3 Кристаллическая структура и основные характеристики представителей СВТК .....	27
<b>1.2 Методы синтеза порошков и плотных покрытий материалов на основе СВТК .....</b>	<b>29</b>
<b>1.3 Методы уплотнения (спекания) и модификации объемной СВТК .....</b>	<b>35</b>
1.3.1 Горячее прессование (ГП) .....	39
1.3.2 Беспрессовое спекание (БС) .....	40
1.3.3 Реакционное спекание (РС) .....	41
<b>1.4 Влияние состава, микроструктуры и методов обработки на механические свойства и трещиностойкость СВТК .....</b>	<b>42</b>
<b>1.5 Окислительная стойкость СВТК-диборидов: влияние состава, микроструктуры и условий испытаний .....</b>	<b>46</b>
1.5.1 Окисление кремнийсодержащих СВТК-диборидов .....	47
1.5.2 Окисление СВТК-диборидов, не содержащих кремний .....	51
1.5.3 Окисление в условиях высокоскоростного потока газа .....	52
<b>1.6 Взаимосвязь параметров спекания, характеристик микроструктуры и окислительной стойкости СВТК-диборидов .....</b>	<b>55</b>

1.6.1 Сравнительный анализ влияния микроструктуры на окисление в различных температурных диапазонах .....	55
1.6.2 Сравнительный анализ микроструктуры, механических свойств и окислительной стойкости композита $\text{HfB}_2\text{--SiC--TaSi}_2$ , полученного методами искрового плазменного спекания и горячего прессования .....	62
<b>1.7 Возможности поверхностной модификации диборидов импульсными энергетическими воздействиями компрессионных плазменных потоков .</b>	<b>66</b>
<b>Выводы к ГЛАВЕ 1 .....</b>	<b>71</b>
<b>ГЛАВА 2 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>74</b>
<b>2.1 Методика электродугового синтеза и искрового плазменного спекания объемных образцов диборидов ниобия и тантала .....</b>	<b>74</b>
<b>2.2 Экспериментальная установка и параметры обработки компрессионными плазменными потоками .....</b>	<b>76</b>
<b>2.3 Описание используемых методов исследования .....</b>	<b>78</b>
2.3.1 Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ .....	78
2.3.2 Сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионный рентгеновский микроанализ .....	79
2.3.3 Атомно-силовая микроскопия .....	81
2.3.4 Измерение микротвердости по Виккерсу .....	82
<b>Выводы к ГЛАВЕ 2 .....</b>	<b>84</b>
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ .....</b>	<b>84</b>
<b>3.1 Исходное состояние образцов: элементный и фазовый состав .....</b>	<b>84</b>
<b>3.2 Влияние обработки компрессионными плазменными потоками на фазовый состав, морфологию поверхности, микротвердость и остаточные напряжения в диборидах <math>\text{NbB}_2</math> и <math>\text{TaB}_2</math> .....</b>	<b>86</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>94</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>97</b>