

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики твердого тела и нанотехнологий

КАРАВАЕВА

Вероника Сергеевна

СТРУКТУРА, МИКРОТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ
ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ZrN и TiN ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ
ОТЖИГЕ НА ВОЗДУХЕ

Дипломная работа

Научный руководитель:
Доцент, кандидат физико-
математических наук
Черенда Николай Николаевич

Допущена к защите

«__» _____ 2026 г.

Зав. кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий

доцент, кандидат физико-математических наук В. И. Шиманский

Минск, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ.....	7
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	23
2.1 Объект исследования.....	23
2.2 Рентгеноструктурный анализ.....	24
2.3 Растровая электронная микроскопия.....	25
2.4 Энергодисперсионный микроанализ.....	26
2.5 Определение микротвердости.....	27
2.6 Измерение массы.....	28
ГЛАВА 3. СТРУКТУРА, МИКРОТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ZrN и TiN ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ НА ВОЗДУХЕ	29
3.1 Морфология поверхности и элементный состав.....	29
3.2 Структурно-фазовое состояние.....	40
3.3 Коррозионная стойкость.....	45
3.4 Изменение микротвердости.....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	50

РЕФЕРАТ

Дипломная работа: 52 с., 31 рис., 6 таблиц, 33 источника.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПОКРЫТИЯ, ЦИРКОНИЙ, ТИТАН, НИТРИД, СТРУКТУРА, ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ, КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ, МИКРОТВЕРДОСТЬ, ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ, ОКИСЛЕНИЕ.

Объектом исследования являются покрытия на основе твердых растворов ZrN и TiN .

Цель работы – изучение стойкости структуры, фазового состава и механических свойств покрытий на основе твердых растворов ZrN и TiN к высокотемпературному окислению на воздухе при температуре $600^{\circ}C$ и времени отжига 1-3 часов.

Методы исследования: рентгеноструктурный анализ, растровая электронная микроскопия, энергодисперсионный микроанализ, измерение массы, определение микротвердости.

Установлено, что в условиях высокотемпературного отжига происходило окисление нитридных покрытий с образованием оксидов металлов, что связывается с переходом нитридов металлов в термодинамически равновесное состояние в условиях кислородсодержащей атмосфере. ZrN переходит преимущественно в ZrO_2 с моноклинной примитивной кристаллической решеткой, TiN переходит в TiO_2 с тетрагональной примитивной решеткой. Объемная доля оксидов увеличивается в анализируемом слое с ростом времени отжига.

В Nb-содержащих покрытиях установлены два механизма разрушения покрытий при отжиге: образование трещин в объеме покрытия и формирование очагов коррозии в области капельной фазы. У покрытий ZrN и $Zr-Hf-N$ основным механизмом разрушения является формирование очагов коррозии в области капельной фазы.

Установлена корреляция между поведением микротвердости с увеличением времени отжига и коррозионной стойкостью покрытий. Микротвердость наиболее коррозионностойких покрытий ZrN и $Zr-Hf-N$, увеличивается с увеличением времени отжига. Покрытие $Zr-Hf-N$ демонстрирует как медленную кинетику окисления при отжиге, так и наибольшее значение микротвердости.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки составов жаростойких и жаропрочных покрытий на основе твердых растворов нитрида циркония.

РЭФЕРАТ

Дыпломная праца: 52 с., 31 мал., 6 табліц, 33 крыніцы.

КЛЮЧАВЫЯ СЛОВЫ: ПАВЕРХНІ, ЦЫРКОНІЙ, ТЫТАН, НІТРЫД, СТРУКТУРА, ІЗАТЭРМІЧНАЕ АБПАЛЬВАННЕ, КАРАЗІЙНАЯ ТРЫВАЛАСЦЬ, МІКРАЦВЁРДАСЦЬ, ЭЛЕМЕНТНЫ САСТАЎ, АКІСЛЕННЕ.

Аб'ектамі даследавання з'яўляюцца пакрыцці на аснове цвёрдых раствораў ZrN і TiN .

Мэта працы – вывучэнне тэрмічнай трываласці структуры, фазавага саставу і механічных уласцівасцей пакрыццяў на аснове цвёрдых раствораў ZrN і TiN , а таксама даследаванне трываласці пакрыццяў да высокатэмпературнага акіслення на паветры пры тэмпературы $600^{\circ}C$ і часу абпальвання 1-3 гадзіны.

Металы даследавання: рэнтгенаструктурны аналіз, растравая электронная мікраскапія, энергетычны дысперсійны мікрааналіз, вымярэнне масы, вызначэнне мікрацвёрдасці.

Устаноўлена, што ва ўмовах высокатэмпературнага абпальвання адбывалася акісленне нітрыдных пакрыццяў з утварэннем аксідаў металаў, што звязана з пераходам нітрыдаў металаў у тэрмадынамічна раўнаважны стан ва ўмовах кіслародазамяшчальнай атмасферы. ZrN пераходзіць пераважна ў ZrO_2 з манакліннай прымітыўнай крышталічнай рашоткай, TiN пераходзіць у TiO_2 з тэтраганальнай прымітыўнай рашоткай. Аб'ёмная доля аксідаў павялічваецца ў аналізуемым слоі з ростам часу абпальвання.

У Nb-змяшчальных пакрыццях устаноўлены два механізмы разбурэння пакрыццяў пры абпальванні: утварэнне расколін у аб'ёме пакрыцця і фарміраванне ачагоў карозіі ў вобласці кропельнай фазы. У пакрыццях ZrN і $Zr-Hf-N$ асноўным механізмам разбурэння з'яўляецца фарміраванне ачагоў карозіі ў вобласці кропельнай фазы.

Устаноўлена карэляцыя паміж паводзінамі мікрацвёрдасці з павелічэннем часу абпальвання і карозійнай трываласці пакрыццяў. Мікрацвёрдасць найбольш карозійнастойкіх пакрыццяў ZrN і $Zr-Hf-N$ павялічваецца з павелічэннем часу абпальвання. Пакрыццё $Zr-Hf-N$ дэманструе як павольную кінетыку акіслення пры абпальванні, так і найбольшае значэнне мікрацвёрдасці.

Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі саставаў гарачаўстойлівых і гарачатрывалых пакрыццяў на аснове цвёрдых раствораў нітрыду цырконію.

ABSTRACT

Thesis: 52 p., 31 fig., 6 tables, 33 sources.

KEY WORDS: COATINGS, ZIRCONIUM, TITANIUM, NITRIDE, STRUCTURE, ISOTHERMAL ANNEALING, CORROSION RESISTANCE, MICROHARDNESS, ELEMENTAL COMPOSITION, OXIDATION.

The object of the study is coatings based on solid solutions of ZrN and TiN.

The aim of the work is to study the thermal resistance of the structure, phase composition and mechanical properties of coatings based on solid solutions of ZrN and TiN, as well as to study the resistance of coatings to high-temperature oxidation in air at a temperature of 600 °C and an annealing time of 1-3 hours.

Research methods: X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, energy dispersive microanalysis, mass measurement, determination of microhardness.

It was found that under conditions of high-temperature annealing, nitride coatings were oxidized with the formation of metal oxides, which is associated with the transition of metal nitrides to a thermodynamically equilibrium state under conditions of an oxygen-containing atmosphere. ZrN passes mainly into ZrO₂ with a monoclinic primitive crystal lattice, TiN passes into TiO₂ with a tetragonal primitive lattice. The volume fraction of oxides increases in the analyzed layer with increasing annealing time.

In Nb-containing coatings, two mechanisms for destruction of coatings during annealing are installed: the formation of cracks in the volume of the coating and the formation of corrosion foci in the area of the droplet phase. In ZrN and Zr-Hf-N coatings, the main mechanism of destruction is the formation of corrosion foci in the region of the droplet phase.

A correlation has been established between the behavior of microhardness with an increase in annealing time and the corrosion resistance of coatings. The microhardness of the most corrosion-resistant coatings ZrN and Zr-Hf-N increases with increasing annealing time. The Zr-Hf-N coating exhibits both slow oxidation kinetics during annealing and the highest microhardness value.

The obtained results can be used to develop compositions of heat-resistant and heat-resistant coatings based on solid solutions of zirconium nitride.