

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА И НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

**БРОНОВ Данила Алексеевич**

**СТРУКТУРА, МИКРОТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННАЯ  
СТОЙКОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ X18H10T,  
ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ**

**Дипломная работа**

**Научный руководитель:  
доцент, канд. физ.-мат. наук  
Н.Н. Черенда**

**Допущен к защите**

**«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026г.**

**Зав. кафедрой физики твердого тела  
Доцент, кандидат физ.-мат. наук  
Шиманский Виталий Игоревич**

**Минск, 2026**

## Реферат

Дипломная работа страниц 49; рисунков 40; таблиц 4; источников 25

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Х18Н10Т, ТИТАН, АЛЮМИНИЙ, ЛЕГИРОВАНИЕ, КОМПРЕССИОННЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПОТОКИ, МИКРОТВЕРДОСТЬ, СКАНИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОТЖИГ.

Объектом исследования является нержавеющая аустенитная сталь Х18Н10Т с покрытием Ti и Al.

**Цель работы** – исследование структурно-фазового состояния, механических свойств и коррозионной стойкости к высокотемпературному окислению поверхностного слоя аустенитной стали марки Х18Н10Т, легированной атомами Ti и Al под действием компрессионных плазменных потоков (КПП).

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

Легирование проводилось путем предварительного осаждения покрытия Ti и Al и последующего воздействия КПП. Установлено, что легирование поверхностного слоя атомами титана и алюминия при плазменном воздействии происходит формирование твердых растворов на основе  $\alpha$ -Fe и нитрида TiN. Уменьшение величины поглощенной энергии приводит к неравномерному распределению легирующих элементов и к образованию трещин в поверхностном слое.

Последующий отжиг в течение 9 часов при температуре 600 °C показал, что твердые растворы на основе  $\alpha$ -Fe являются стабильными. Легирование поверхностного слоя приводит к увеличению коррозионной стойкости к высокотемпературному окислению. Образец, обработанный КПП с энергией 22 Дж/см<sup>2</sup>, обладает наибольшей коррозионной стойкостью.

Установлено, что легирование при помощи КПП приводит к увеличению микротвердости. Максимальное увеличение микротвердости в 1,5 раза наблюдается при плотности поглощенной энергии 10 Дж/см<sup>2</sup>. Обнаружено увеличение микротвердости легированных образцов с увеличением времени отжига. Для образца, обработанного КПП с энергией 22 Дж/см<sup>2</sup>, наблюдается увеличение в 2,4 раза по сравнению с исходной сталью.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки ресурсосберегающей плазменной технологии повышения эксплуатационных характеристик поверхности аустенистных нержавеющих сталей.

## Рэферат

Дыпломная праца старонак 49; малюнкаў 40; табліц 4; крыніц 25

**КЛЮЧАВЫЯ СЛОВА:** Х18Н10Т, ТЫТАН, АЛЮМІНІЙ, ЛЕГІРАВАННЕ, КАМПРЭСІЙНЫЯ ПЛАЗМЕННЫЯ ПАТОКІ, МІКРАЦВЕРДАСЦЬ, СКАНУЮЧА ЭЛЕКТРОННАЯ МІКРАСКОПІЯ, АДПАЛ.

Аб'ектам даследавання з'яўляецца нержавеючая аўстэнітная сталь Х18Н10Т з пакрыццем Ti і Al.

**Мэта працы** - даследаванне структурна-фазавага стану, механічны уласцівасцяў і каразійнай устойлівасці да высокатэмпературнага акіслення павярхоўнага пласта аўстэнітной сталі маркі Х18Н10Т, легіраванай атамамі Ti і Al пад дзеяннем компрэсіонных плазменных патокаў (КПП).

Метады даследавання: рэнтгенаструктурны аналіз, растравая электронная мікраскопія, энергадысперсійны мікрааналіз, вымярэнне масы, вымярэнне мікрацвёрдасці.

Легіраванне праводзілася шляхам папярэдняга аблогі пакрыцця Ti і Al і наступнага ўздзеяння КПП. Устаноўлена, што легаванне павярхоўнага пласта атамамі тытана і алюмінія пры плазменным уздзеянні адываеца фарміраванне цвёрдых раствороў на аснове  $\alpha$ -Fe і нітрыду TiN. Памяншэнне велічыні паглынутай энергіі прыводзіць да нераўнамернага размеркавання легавальных элементаў і да адкуацыі расколін у павярхоўным пласце.

Наступны адпал на працягу 9 гадзін пры тэмпературы 600 °C паказаў, што цвёрдыя растворы на аснове  $\alpha$ -Fe з'яўляюцца стабільнымі. Легіраванне павярхоўнага пласта прыводзіць да павелічэння каразійнай устойлівасці да высокотэмпературному акісленню. Узор, апрацаваны КПП з энергией 22 Дж/см<sup>2</sup>, валодае найвялікай каразійнай устойлівасцю.

Устаноўлена, што легаванне пры дапамозе КПП прыводзіць да павелічэння мікрацвёрдасці. Максімальнае павелічэнне мікрацвёрдасці ў 1,5 разы назіраецца пры шчыльнасці паглынутай энергіі 10 Дж/см<sup>2</sup>. Выяўлена павелічэнне мікрацвёрдасці легіраваных узороў з павелічэннем часу адпалу. Для ўзору, апрацаванага КПП з энергией 22 Дж/см<sup>2</sup>, назіраецца павелічэнне ў 2,4 разы ў параўнанні з зыходнай сталлю.

Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі рэсурсозберагающей плазменнай тэхналогіі павышэння эксплуатацыйных характеристыстык паверхні аўстэністных нержавеючыхсталей.

## **Summary**

**Graduate work contains** 49 pages, 40 pictures, 4 sheets and 25 sources.

**KEYWORDS:** Kh18N10T, TITANIUM, ALUMINUM, ALLOYING, COMPRESSION PLASMA FLOWS, MICROHARDNESS, SCANNING ELECTRON MICROSCOPY, ANNEALING.

The object of this study is Kh18N10T austenitic stainless steel with a Ti and Al coating.

**The objective of this study** is to investigate the structural and phase state, mechanical properties, and corrosion resistance to high-temperature oxidation of the surface layer of austenitic steel grade Kh18N10T alloyed with Ti and Al atoms under the action of compression plasma flows (CPFs).

Research methods: X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, energy-dispersive microanalysis, mass measurements, and microhardness measurements.

Alloying was performed by pre-depositing a Ti and Al coating and subsequent CPF exposure. It was found that alloying the surface layer with titanium and aluminum atoms under plasma exposure results in the formation of solid solutions based on  $\alpha$ -Fe and TiN nitride. A decrease in the absorbed energy leads to an uneven distribution of alloying elements and the formation of cracks in the surface layer.

Subsequent annealing for 9 hours at 600°C demonstrated that the  $\alpha$ -Fe-based solid solutions are stable. Alloying the surface layer increases corrosion resistance to high-temperature oxidation. The sample treated with CPP at an energy of 22 J/cm<sup>2</sup> exhibits the highest corrosion resistance.

It was found that alloying with CPP increases microhardness. The maximum increase in microhardness by a factor of 1.5 is observed at an absorbed energy density of 10 J/cm<sup>2</sup>. An increase in microhardness of the alloyed samples with increasing annealing time was observed. For the sample treated with CPP at an energy of 22 J/cm<sup>2</sup>, an increase of 2.4 times is observed compared to the original steel.

These results can be used to develop a resource-saving plasma technology for improving the surface performance of austenitic stainless steels.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОННЫХ, ЭЛЕКТРОННЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ.....	7
ГЛАВА 2 ОБЪЕКТ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ, РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ .....	24
2.1 Объект исследования.....	24
2.2 Режимы обработки.....	26
2.3 Рентгеноструктурный анализ .....	27
2.4 Измерение микротвердости .....	28
2.5 Измерение массы образцов.....	29
2.6 Растворная электронная микроскопия.....	30
2.7 Энергодисперсионный микроанализ .....	31
ГЛАВА 3 СТРУКТУРА И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ Х18Н10Т, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ.....	33
3.1 Морфология поверхности и элементный состав .....	33
3.2 Структурно-фазовое состояние .....	39
3.3 Коррозионная стойкость .....	44
3.4 Измерение микротвердости .....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	47
ЛИТЕРАТУРА .....	48