

УДК 621.891+621.762:71, УДК 539.3:621.891

## Износостойкость модифицированных азотом высоколегированных сталей в условиях трения без смазочного материала

В.А. Кукареко<sup>1</sup>, В.В. Можаровский<sup>2</sup>, А.В. Кушнеров<sup>1</sup>, С.А. Марьин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь

<sup>2</sup>Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,  
ул. Советская, 104, г. Гомель 246028, Беларусь

Поступила в редакцию 15.07.2024.

После доработки 30.11.2024.

Принята к публикации 10.12.2024.

Для слоистого материала «высокопрочное покрытие — основа» с различающимися значениями толщины упрочнённого слоя проведено конечно-элементное моделирование напряжённо-деформированного состояния, формирующегося при трении. Показано, что с уменьшением толщины покрытия регистрируется существенное возрастание уровня сдвиговых напряжений, действующих в основе при трении. Изучены закономерности изнашивания в условиях сухого трения модифицированных ионами азота высокохромистых сталей 12X18H10T и 40X13, различающихся твёрдостью основы и толщиной азотированного слоя. Сделано заключение, что аномально высокая интенсивность изнашивания тонкого азотированного слоя в стали 12X18H10T связана с накоплением сдвиговых деформаций в пластичной аустенитной основе при трении, а также с высоким градиентом значений твёрдости по глубине упрочнённого слоя в стали и фазовым  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращением в основе при фрикционном взаимодействии. Исследовано влияние твёрдости основы на износостойкость азотированной стали 40X13. Установлено, что увеличение твёрдости основы стали 40X13 приводит к снижению интенсивности изнашивания тонких азотированных слоёв на поздних стадиях триботехнических испытаний, что связано с замедлением процессов накопления сдвиговых деформаций в твёрдой основе стали при трении.

**Ключевые слова:** хромистые стали, азотирование, микротвёрдость, контактное взаимодействие, метод конечных элементов, сдвиговые напряжения, трение, износостойкость.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-6-473-485

---

**Адрес для переписки:**

В.А. Кукареко  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: v\_kukareko@mail.ru

**Address for correspondence:**

V.A. Kukareko  
The Joint Institute of Mechanical Engineering  
of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: v\_kukareko@mail.ru

---

**Для цитирования:**

В.А. Кукареко, В.В. Можаровский, А.В. Кушнеров, С.А. Марьин.  
Износостойкость модифицированных азотом высоколегированных сталей в условиях трения без смазочного материала.  
Трение и износ.  
2024. — Т. 45, № 6. — С. 473—485.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-6-473-485

**For citation:**

V.A. Kukareko, V.V. Mozharovsky, A.V. Kushnerou and S.A. Marjin.  
[Wear Resistance of Nitrogen-Modified High-Alloy Steel under Friction Conditions without Lubricant].  
*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 6, pp. 473—485 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-6-473-485

# Wear Resistance of Nitrogen-Modified High-Alloy Steel under Friction Conditions without Lubricant

V.A. Kukareko<sup>1</sup>, V.V. Mozharovsky<sup>2</sup>, A.V. Kushnerou<sup>1</sup> and S.A. Marjin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus

<sup>2</sup>Francisk Skorina Gomel State University, Savietskaja Str., 104, Gomel 246028, Belarus

Received 15.07.2024.

Revised 30.11.2024.

Accepted 10.12.2024.

## Abstract

For a layered material “high-strength coating — base” with different values of the thickness of the strengthened layer, finite element modeling of the stress-strain state formed during friction was carried out. It is shown that with a decrease in the thickness of the coating, a significant increase in the level of shear stresses acting in the base during friction is recorded. The patterns of wear under dry friction conditions of high-chromium steels AISI 304 and AISI 420 modified with nitrogen ions, differing in the hardness of the base and the thickness of the nitrided layer, have been studied. It is concluded that the abnormally high wear rate of a thin nitrided layer in steel AISI 304 is associated with the accumulation of shear strains in the plastic austenitic base during friction, as well as with a high gradient of hardness values along the depth of the hardened layer in the steel and a phase  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation in the base during frictional interaction. The influence of base hardness on the wear resistance of nitrided steel AISI 420 was studied. It has been established that an increase in the hardness of the AISI 420 steel base leads to a decrease in the wear rate of thin nitrided layers at the later stages of tribological tests, which is associated with a slowdown in the accumulation of shear strains in the solid steel base during friction.

**Keywords:** chromium steels, nitriding, microhardness, contact interaction, finite element method, shear stress, friction, wear resistance.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-6-473-485

---

### Адрес для переписки:

В.А. Кукареко  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: v\_kukareko@mail.ru

### Address for correspondence:

V.A. Kukareko  
The Joint Institute of Mechanical Engineering  
of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: v\_kukareko@mail.ru

---

### Для цитирования:

В.А. Кукареко, В.В. Можаровский, А.В. Кушнеров, С.А. Маржин.  
Износостойкость модифицированных азотом  
высоколегированных сталей в условиях трения без смазочного  
материала.  
Трение и износ.  
2024. — Т. 45, № 6. — С. 473—485.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-6-473-485

### For citation:

V.A. Kukareko, V.V. Mozharovsky, A.V. Kushnerou and S.A. Marjin.  
[Wear Resistance of Nitrogen-Modified High-Alloy Steel under  
Friction Conditions without Lubricant].  
*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 6, pp. 473—485 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-6-473-485

## Список использованных источников

1. **Алехин В.П.** Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. — М.: Наука. — 1983
2. **Бакли Д.** Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. — М.: Машиностроение. — 1986
3. **Марченко Е.А.** О природе разрушения металлов при трении. — М.: Наука. — 1979
4. **Суслов А.Г.** Инженерия поверхности деталей. — М.: Машиностроение. — 2008
5. **Витязь П.А., Жорник В.И.** Методы инженерии поверхности и нанотехнологии для повышения ресурса изнашиваемых поверхностей // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя фізіка-тэхнічных навук. — 2017, № 3, 30—46
6. **Махутов Н.А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. — Новосибирск: Наука. — 2005. — Ч. 1: Критерии прочности и ресурса; Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности
7. **Будилов В.В., Мухин В.С., Шехтман С.Р.** Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионноплазменных методов. Физические основы и технические решения. — М.: Наука. — 2008
8. **Кукареко В.А., Можаровский В.В., Кушнеров А.В., Мар'ин С.А.** Закономерности изнашивания упрочненной ионами азота аустенитной стали 12X18H10T // Проблемы физики, математики и техники. — 2020, № 4(45), 37—43
9. **Марков Д.П., Келли Д.** Адгезионно-иницируемые типы катастрофического изнашивания // Трение и износ. — 2002 (23), № 5, 483—493
10. **Джонсон К.** Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. — М.: Мир. — 1989
11. **Можаровский В.В., Рогачева Н.А.** Исследование напряженного состояния волокнистого композиционного материала с однородным покрытием при контакте с цилиндрическим индентором // Материалы, технологии, инструменты. — 2000 (5), № 2, 5—10
12. **Можаровский В.В., Кукареко В.А., Мар'ин С.А., Кушнеров А.В.** Численный расчет и анализ напряженного состояния в слоистом теле при трении с учетом изменения модулей упругости покрытия и основания // Проблемы физики, математики и техники. — 2024, № 1(58), 22—28
13. **Белый А.В.** Высокоинтенсивная низкоэнергетическая имплантация ионов азота // Физическая мезомеханика, — 2002 (5), № 1, 95
14. **Кушнеров А.В., Кукареко В.А., Белый А.В.** Закономерности адгезионного изнашивания упрочненной ионами азота хромистой стали аустенитного класса // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов / ред. кол.: В.Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — кн. 1. Материаловедение. —

Минск: ФТИ НАН Беларуси. — 2022, 153—162

15. **Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б.** Диффузия атомов и ионов в твердых телах. — М.: МИСИС. — 2005

## References

1. **Alekhin V.P.** Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnykh sloev materialov. — M.: Nauka. — 1983 (in Russian)
2. **Bakli D.** Poverkhnostnye yavleniya pri adgezii i friktsionnom vzaimodeistvii. — M.: Mashinostroenie. — 1986 (in Russian)
3. **Marchenko, E.A.** O prirode razrusheniya metallov pri trenii. — M.: Nauka. — 1979 (in Russian)
4. **Suslov A.G.** Inzheneriya poverkhnosti detalei. — M.: Mashinostroenie. — 2008 (in Russian)
5. **Vityaz' P.A., Zhornik V.I.** Metody inzhenerii poverkhnosti i nanotekhnologii dlya povysheniya resursa iznashivaemykh poverkhnostei // Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk. — 2017, № 3, 30—46 (in Russian)
6. **Makhutov N.A.** Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost': V 2 ch. — Ch. 1: Kriterii prochnosti i resursa; Ch. 2: Obosnovanie resursa i bezopasnosti. — Novosibirsk: Nauka. — 2005 (in Russian)
7. **Budilov V.V., Mukhin V.S., Shekhtman S.R.** Nanotekhnologii obrabotki poverkhnosti detalei na osnovе vakuumnykh ionnoplazmennykh metodov. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie resheniya. — M.: Nauka. — 2008 (in Russian)
8. **Kukareko V.A., Mozharovskii V.V., Kushnerov A.V., Mar'in S.A.** Zakonomernosti iznashivaniya uprochnennoi ionami azota austenitnoi stali 12Kh18N10T // Problemy fiziki, matematiki i tekhniki. — 2020, № 4(45), 37—43 (in Russian)
9. **Markov D.P., Kelli D.** Adgezionno-initsiiuruyemye tipy katastroficheskogo iznashivaniya // Trenie i iznos. — 2002 (23), № 5, 483—493 (in Russian)
10. **Dzhonson K.** Mekhanika kontaktnogo vzaimodeistviya: per. s angl. — Moskva: Mir. — 1989 (in Russian)
11. **Mozharovskii V.V., Rogacheva N.A.** Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya voloknistogo kompozitsionnogo materiala s odnorodnym pokrytiem pri kontakte s tsilindricheskim indentorom // Materialy, tekhnologii, instrumenty. — 2000 (5), № 2, 5—10 (in Russian)
12. **Mozharovskii V.V., Kukareko V.A., Mar'in S.A., Kushnerov A.V.** Chislennyi raschet i analiz napryazhennogo sostoyaniya v sloistom tele pri trenii s uchetom izmeneniya modulei uprugosti pokrytiya i osnovaniya // Problemy fiziki, matematiki i tekhniki. — 2024, № 1(58), 22—28 (in Russian)
13. **Belyi A.V.** Vysokointensivnaya nizkoenergeticheskaya implantatsiya ionov azota // Fizicheskaya mezomekhanika, — 2002 (5), № 1, 95 (in Russian)

14. **Kushnerov A.V., Kukareko V.A., Belyi A.V.** Zakonomernosti adgezionnogo iznashivaniya uprochnennoi ionami azota khromistoi stali austenitnogo klassa // Sbornik nauchnykh trudov «Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov». — Minsk: FTI NAN Belarusi. — 2022, 153—162 (in Russian)
15. **Bokshtein B.S., Yaroslavtsev A.B.** Diffuziya atomov i ionov v tverdykh telakh. — M.: MISIS. — 2005 (in Russian)

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.  
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11  
*Full text of articles can be purchased from the editorial office.*  
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11  
E-mail: [FWJ@tut.by](mailto:FWJ@tut.by)