

УДК 621.785.532

## Повышение износостойкости деталей машин из алюминиевых сплавов ионным азотированием при высокоэнергетической активации

Н.К. Криони, А.А. Мингажева, А.Д. Мингажев

Уфимский Университет Науки и Технологий»,  
ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа 450001, Россия

Поступила в редакцию 20.09.2023.

После доработки 08.02.2024.

Принята к публикации 15.02.2024.

Рассмотрены результаты исследований износостойкости деталей машин из алюминиевых сплавов с азотированными слоями, полученными при активации поверхностных слоёв (ПС). Показано, что применительно к алюминиевым сплавам традиционные технологии ионного азотирования малоэффективны из-за низкой скорости диффузии азота и неоднородной структуры азотированного слоя (АС). Представлены результаты четырёхкратного повышения интенсивности диффузионных процессов ионного азотирования при активации поверхностного слоя алюминиевого сплава методами поверхностной пластической деформации и высокоэнергетической ионной имплантации по сравнению с традиционным ионным азотированием. Показано, что при подготовке поверхности алюминиевого сплава методом высокоэнергетической ионной имплантации обеспечивается износостойкость азотированного слоя, превышающая более чем в три раза износостойкость азотированного слоя, полученного при подготовке поверхности методом поверхностной пластической деформации. Предложена новая технология ионного азотирования, позволяющая за счёт устранения оксидной плёнки ионным травлением в вакуум повысить производительность процесса азотирования и износостойкость АС. Показано, что использование метода высокоэнергетической ионной имплантации при энергии ионов порядка 25 кэВ обеспечивает, за счёт возникновения эффекта дальнего действия, образование в поверхностном слое деталей из алюминиевых сплавов на глубине соизмеримой с толщиной азотированного слоя радиационных дефектов кристаллической структуры, позволяющих значительно интенсифицировать диффузию азота, а также произвести блокирование границ зёрен тормозящих в них диффузионные процессы.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, оксидная пленка, ионное травление, поверхностный слой, высокоэнергетическая ионная имплантация, радиационные дефекты, азотирование, износ, трение.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-68-74

---

**Адрес для переписки:**

Н.К. Криони  
Уфимский Университет Науки и Технологий»,  
ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа 450001, Россия  
e-mail: nkrioni@mail.ru

**Для цитирования:**

Н.К. Криони, А.А. Мингажева, А.Д. Мингажев.  
Повышение износостойкости деталей машин из алюминиевых сплавов ионным азотированием при высокоэнергетической активации.  
Трение и износ.  
2024. – Т. 45, № 1. – С. 68–74.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-68-74

---

**Address for correspondence:**

N.K. Krionia  
Ufa University of Science and Technology,  
Karl Marx str., 12, Ufa 450001, Russia  
e-mail: nkrioni@mail.ru

**For citation:**

N.K. Krionia, A.A. Mingazheva, and A.D. Mingazhev.  
[Increasing the Wear Resistance of Machine Parts Made of Aluminum Alloys by Ion Nitriding with High-Energy Activation].  
Trenie i Iznos.  
2024, vol. 45, no. 1, pp. 68–74 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-68-74

# Increasing the Wear Resistance of Machine Parts Made of Aluminum Alloys by Ion Nitriding with High-Energy Activation

N.K. Krionia, A.A. Mingazheva, and A.D. Mingazhev

Ufa University of Science and Technology,  
Karl Marx str., 12, Ufa 450001, Russia

Received 20.09.2023.

Revised 08.02.2024.

Accepted 15.02.2024.

## Abstract

The results of studies on the wear resistance of machine parts made of aluminum alloys with insulated layers obtained by activating surface layers (SL) are considered. It is shown that, in relation to aluminum alloys, traditional ion nitriding technologies are ineffective due to the low rate of nitrogen diffusion and the heterogeneous structure of the nitrided layer (NL). The results of a fourfold increase in the intensity of diffusion processes of ion nitriding during activation of the surface layer of an aluminum alloy by methods of surface plastic deformation and high-energy ion implantation compared with traditional ion nitriding are presented. It is shown that when preparing the surface of an aluminum alloy by the method of high-energy ion implantation, the wear resistance of the nitrided layer is provided, exceeding by more than three times the wear resistance of the nitrided layer obtained during surface preparation by the method of surface plastic deformation. A new ion nitriding technology has been proposed, which makes it possible to increase the productivity of the nitriding process and the wear resistance of the AC by eliminating the oxide film by ion etching in vacuum. It is shown that the use of the method of high-energy ion implantation at an ion energy of about 25 keV ensures, due to the occurrence of a long-range effect, the formation of aluminum alloy parts in the surface layer at a depth commensurate with the thickness of the nitrided layer of radiation defects of the crystal structure, which significantly intensify nitrogen diffusion, as well as block grain boundaries inhibiting diffusion processes in them.

**Keywords:** aluminum alloys, oxide film, ion etching, surface layer, high-energy ion implantation, radiation defects, nitriding, wear, friction.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-68-74

---

### Адрес для переписки:

Н.К. Криони  
Уфимский Университет Науки и Технологий»,  
ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа 450001, Россия  
e-mail: nkrioni@mail.ru

### Для цитирования:

Н.К. Криони, А.А. Мингажева, А.Д. Мингажев.  
Повышение износостойкости деталей машин из алюминиевых сплавов ионным азотированием при высокоэнергетической активации.  
Трение и износ.  
2024. – Т. 45, № 1. – С. 68–74.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-68-74

---

### Address for correspondence:

N.K. Krionia  
Ufa University of Science and Technology,  
Karl Marx str., 12, Ufa 450001, Russia  
e-mail: nkrioni@mail.ru

### For citation:

N.K. Krionia, A.A. Mingazheva, and A.D. Mingazhev.  
[Increasing the Wear Resistance of Machine Parts Made of Aluminum Alloys by Ion Nitriding with High-Energy Activation].  
*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 1, pp. 68–74 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-68-74

## Список использованных источников

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбаров В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение. — 1977
2. Sears K. Aluminum Alloys in Cars // Automotive Engineering: Strategic Overview. — 1997, no. 2, 55—68
3. Богрякова Е.В., Федорова Е.А. Сравнительный анализ оксидных покрытий на сплавах Д16 при микродуговом и электрохимическом оксидировании // Известия вузов. Сер. Химия и химическая технология. — 2007 (50), № 11, 120—121
4. Wang Y. and Tung S.C. Scuffing and Wear Behavior of Aluminum Piston Skirt Coatings Against Aluminum Cylinder Bore // Wear. — 1999 (225-229), 1100—1108
5. Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Панин В.В. Заполнение рабочей камеры технологической установки однородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда // Физика плазмы. — 2009 (35), № 12, 1140—1149
6. Панайоти Т.А. Создание газовой среды с предельной насыщающей способностью при ионном азотировании сплавов // Физика и химия обработки материалов. — 2003, № 4, 70—78
7. Электронно-ионно-плазменная модификация цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Ковалы и Ю.Ф. Иванова. — Томск: Изд-во НТЛ. — 2016
8. Process for Ion Nitriding of Aluminium or an Aluminium Alloy and Apparatus therefor: US Patent № 4522660. — 1985
9. Suryanarayana C. Mechanical Alloying and Milling // Progress in Materials Science. — 2001, no. 46, 184
10. Ferrasse S., Hartwig K.T., Goforth R.E. et al. Microstructure and Properties of Copper and Aluminum Alloy 3003 Heavily Worked by Equal Channel Angular Extrusion // Metall. Mater. Trans. A. — 1997 (28), 1047—1057
11. Patama Visuttipitukul1, Tatsuhiko Aizawa, and Hideyuki Kuwahara. Advanced Plasma Nitriding for Aluminum and Aluminum Alloys // Materials Transactions. — 2003 (44), no. 12, 2695—2700
12. Герасимов С.А., Куksenova Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. — 2-е изд., испр. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2014
13. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. — М.: Наука. — 1979
14. Криони Н.К., Мингажева А.А., Мингажев А.Д. Повышение износостойкости азотированного слоя деталей машин из легированных сталей высокоинтенсивными и высокоэнергетическими методами // Трение и износ. — 2022 (43), № 6, 341—349
15. Бокштейн С.З. Диффузия и структура металлов. — М.: Metallurgy. — 1973

## References

1. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Fundamentals of calculations for friction and wear. — Moscow: Mashinostroenie. — 1977 (in Russian)
2. Sears K. Aluminum Alloys in Cars // Automotive Engineering: Strategic Overview. — 1997, no. 2, 55—68
3. Bogryakova E.V., Fedorova E.A. Comparative analysis of oxide coatings on D16 alloys during microarc and electrochemical oxidation // Izvestia vuzov. Sere. Chemistry and Chemical Technology. — 2007 (50), № 11, 120—121 (in Russian)
4. Wang Y. and Tung S.C. Scuffing and Wear Behavior of Aluminum Piston Skirt Coatings Against Aluminum Cylinder Bore // Wear. — 1999 (225-229), 1100—1108
5. Metel A.S., Grigoriev S.N., Melnik Yu.A., Panin V.V. Filling the working chamber of a technological installation with homogeneous plasma using a stationary glow discharge // Plasma Physics. — 2009 (35), no. 12, 1140—1149 (in Russian)
6. Panajoti T.A. Creation of gaseous medium with ultimate saturating power under ion nitriding of the alloys // Physics and Chemistry of Materials Treatment. — 2003, no. 4, 70—78 (in Russian)
7. Electron-ion-plasma modification of non-ferrous metals and alloys / under the general editorship of N.N. Koval and Yu.F. Ivanov. — Tomsk: Publishing house of NTL. — 2016 (in Russian)
8. Process for Ion Nitriding of Aluminium or an Aluminium Alloy and Apparatus therefor: US Patent № 4522660. — 1985
9. Suryanarayana C. Mechanical Alloying and Milling // Progress in Materials Science. — 2001, no. 46, 184
10. Ferrasse S., Hartwig K.T., Goforth R.E. et al. Microstructure and Properties of Copper and Aluminum Alloy 3003 Heavily Worked by Equal Channel Angular Extrusion // Metall. Mater. Trans. A. — 1997 (28), 1047—1057
11. Patama Visuttipitukul1, Tatsuhiko Aizawa, and Hideyuki Kuwahara. Advanced Plasma Nitriding for Aluminum and Aluminum Alloys // Materials Transactions. — 2003 (44), no. 12, 2695—2700
12. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys. - 2nd ed., ispr. — Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. — 2014 (in Russian)
13. Geguzin Ya.E. Diffusion zone. — М.: Nauka. — 1979 (in Russian)
14. Krionia N.K., Mingazheva A.A., Mingazhev A.D. Increasing the wear resistance of the nitrided layer of machine parts made of alloy steels by high-intensity and high-energy methods // Friction and wear. — 2022 (43), no. 6, 341—349 (in Russian)
15. Bokshstein S.Z. Diffusion and structure of metals. — М.: Metallurgy. — 1973 (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@mpri.org.by](mailto:FWJ@mpri.org.by)