Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 621.785:669.14.08

Оригинальная статья

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМУ АЗОТИРОВАНИЮ

Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова, С.В. Лыков, Ю.А. Денисова, О.С. Толкачев
ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»
634055, Россия, Томск, пр-т Академический, 2/3
yufi55@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.805

Аннотация: Ионное азотирование является одним из наиболее распространенных способов поверхностного упрочнения деталей и инструмента. Цель настоящей работы – выявление и анализ закономерностей преобразования структуры и свойств поверхностного слоя высокохромистой нержавеющей стали, подвергнутой низкотемпературному азотированию в плазме газового разряда низкого давления. Установлено, что насыщение азотом (793 К, 3 час.) аустенитной высокохромистой стали 20Х23Н18 в плазме газового разряда низкого давления сопровождается формированием в слое толщиной (55–60) мкм структуры пластинчатого типа с чередующимися пластинами аустенита и нитрида железа (поперечные размеры пластин не превышают 10 нм), микротвердость и износостойкость которой превышают в 6,5 раз и более чем в 400 раз соответствующие характеристики исходного состояния.

Ключевые слова: плазма газового разряда низкого давления, аустенитная сталь, фазовый состав, дефектная субструктура, микротвердость, износостойкость.

1. Введение

Повышение срока службы деталей машин и механизмов, работающих в условиях трения и износа, весьма часто возможно путем изменения характеристик сравнительно тонкого поверхностного слоя без изменения состояния основы изделия, что во многих случаях существенно уменьшает себестоимость деталей и ресурсозатратность их изготовления. Для достижения этих целей в настоящее время используют ТВЧ-закалку [1], обработку электронным пучком [2, 3], механическое [4], лазерное [5] и ультразвуковое воздействие [6], ионную имплантацию [7, 8], ионный миксинг [9], а также различные методы, основанные на диффузии легирующего элемента в условиях нагрева обрабатываемых деталей до температур, характерных для эффективной диффузии добавляемого элемента (673-1473) К [10].

Ионное азотирование является одним из наиболее распространенных способов поверхностного упрочнения деталей и инструмента, использование которого в промышленно развитых странах постоянно расширяется. Данный способ обладает целым рядом преимуществ по сравнению с традиционным газовым азотированием: возможность регулирования параметров обработки в широком диапазоне режимов; высокая скорость насыщения; получение диффузионных слоев заданного фазового состава и строения; высокий класс чистоты поверхности;

большая экономичность процесса [10-13]. Выделяют, применительно к сталям, низкотемпературное и высокотемпературное (873–1473 К) азотирование. Границей в данном случае является температура 863 К, соответствующая эвтектоидному $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma'$ -превращению (γ' – нитрид железа Fe_4N) на диаграмме фазового равновесия системы железо-азот [14]. Как правило, фазовый состав азотированного слоя закономерным образом изменяется при удалении от поверхности образца. При низкотемпературном азотировании высокохромистой аустенитной стали в поверхностном слое образца благодаря высокой концентрации азота присутствуют нитриды железа и хрома (CrN , Cr_2N и Fe_4N), а также S -фаза (насыщенный азотом аустенит), которая часто обнаруживается при низкотемпературном азотировании высокохромистой аустенитной стали [15-17].

Целью настоящей работы является выявление и анализ закономерностей преобразования структуры и свойств поверхностного слоя высокохромистой нержавеющей стали, подвергнутой низкотемпературному азотированию в плазме газового разряда низкого давления.

2. Материал и методики исследования

В качестве материала исследований использована нержавеющая сталь аустенитного класса марки 20Х23Н18 [18]. Образцы имели форму пластинок размерами 10×10×5 мм. Азотирование стали осуществляли в плазме газового разряда низкого давления при вариации температуры (723–873) К и времени (1–5) час. Исследование структуры стали в исходном состоянии и после модифицирования осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000), оптической (Микровизор металлографический μ Vizo-MET-221), сканирующей (прибор SEM 515 Philips) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F) электронной микроскопии. Свойства модифицированного слоя характеризовали, определяя микротвердость (прибор ПМТ-3, нагрузка на индентор 0,5 Н и 2 Н) и износостойкость (прибор TRIBOtechnik; условие сухого трения при комнатной температуре, контртело – шарик ШХ15 диаметром 6 мм, диаметр трека 4 мм, скорость вращения образца 2,5 см/с, нагрузка на индентор 1 Н, количество оборотов 8000). Износостойкость поверхностного слоя материала рассчитывали после проведения профилометрии образовавшегося трека.

3. Результаты и обсуждение

Проведены исследования микротвердости поверхностного слоя стали 20Х23Н18, подвергнутой азотированию в плазме газового разряда

низкого давления, и выявлена зависимость твердости стали от температуры и времени процесса (см. рис. 1 а). Установлено, что скорость упрочнения поверхностного слоя стали увеличивается с ростом температуры азотирования, достигая максимального значения при 873 К (1 час.) (см. рис. 1 б, кривая 3). Увеличение времени азотирования при температурах 793 К и 873 К сопровождается снижением скорости упрочнения. Азотирование стали при температуре 723 К сопровождается увеличением скорости упрочнения стали с ростом времени азотирования.

Рис. 1. Зависимость твердости (а) и скорости увеличения твердости (б) поверхностного слоя стали 20X23H18 от времени азотирования в плазме газового разряда низкого давления при температурах 723 К (кривая 1), 793 К (кривая 2), 873 К (кривая 3). Нагрузка на индентор 2 Н.

Построены профили твердости стали 20X23H18, подвергнутой азотированию. Обнаружено, что, твердость стали максимальна у поверхности азотирования и монотонно снижается по мере увеличения расстояния от поверхности образца (см. рис. 2 а).

Установлено, что толщина упрочненного слоя составляет (55–60) мкм и слабо зависит от температуры (в интервале 793–873 К) и длительности (3–5 час.) процесса (см. рис. 2 а). Азотированный слой имеет столбчатую структуру (см. рис. 2 б). Между азотированным слоем и нижележащим объемом образца наблюдается четкая граница раздела.

Выполнены трибологические испытания стали 20X23H18, подвергнутой азотированию. Показано, что параметр износа поверхностного слоя стали определяется и температурой, и временем азотирования (см. рис. 3 а). Азотирование при температуре 723 К сопровождается ростом параметра износа (снижением износостойкости материала) с увеличением времени азотирования. При температурах 793 К

и 873 К наблюдается снижением параметра износа с увеличением времени азотирования.

Рис. 2. Профили микротвердости стали 20Х23Н18, подвергнутой ионному азотированию в плазме газового разряда низкого давления; 1 – 793 К, 3 час.; 2 – 873 К, 5 час. Нагрузка на индентор 0,5 Н. На (б) приведено электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного травленного шлифа стали, подвергнутой азотированию при 873 К, 5 час.

Рис. 3. Зависимость параметра износа (а) и коэффициента трения (б) поверхностного слоя стали 20Х23Н18 от времени азотирования в плазме газового разряда низкого давления при температурах 723 К (кривая 1), 793 К (кривая 2) и 873 К (кривая 3). Параметр износа стали в исходном состоянии $170 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н·м; коэффициент трения стали в исходном состоянии 0,56.

Установлено, что минимальное значение параметра износа (максимальная износостойкость) достигается при температуре азотирования 873 К, 3 час. и составляет $0,4 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н·м, что меньше

параметра износа стали 20Х23Н18 в исходном состоянии в 425 раз. Минимальное значение коэффициента трения (0,515, что ниже коэффициента трения исходной стали в $\approx 1,1$ раза) достигается после азотирования при температуре 793 К, 3 час. (см. рис. 3 б, кривая 2).

Методами рентгеноструктурного анализа показано, что наиболее многоступенчатое преобразование фазового состава материала наблюдается в процессе азотирования при температуре 723 К. Цепочка фазовых превращений, имеющих место при данной температуре азотирования, может быть представлена следующим образом:

При температурах азотирования 793 К и 873 К основными фазами азотированного слоя уже после 1 часа являются Fe_4N , CrN , $\alpha\text{-Fe}$. Увеличение времени в интервале (1–5) часов (независимо от температуры азотирования) приводит к росту суммарной доли нитридов железа и хрома, достигая 90 масс.% после 5 часов азотирования.

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлено, что поверхностный слой азотированной стали толщиной (5–10) мкм имеет зеренно-субзеренную структуру (см. рис. 4 а).

Размеры зерен и субзерен изменяются в пределах (15–50) нм. Нанометровый диапазон зеренно-субзеренной структуры поверхностного слоя подтверждается соответствующей микроэлектронограммой, имеющей квазиколецовое строение (см. рис. 4 б). При большем удалении от поверхности азотирования в структуре стали обнаруживаются зерна с пластинчатой (перлитоподобной) субструктурой (см. рис. 4 в). Пластинки располагаются параллельными рядами и занимают зерно полностью. Поперечные размеры пластинок изменяются в пределах (5–10) нм. Размеры зерен изменяются в пределах (300–450) нм. Микроэлектронограмма данной структуры представлена на рис. 4 г. Сопоставляя рис. 4 б и рис. 4 г, можно отметить, что, несмотря на наноразмерный диапазон рассматриваемых областей структуры стали, микроэлектронограммы кардинально отличаются друг от друга. В первом случае формируется квазиколецовая электронограмма, во втором – электронограмма, характерная для двухфазных (многофазных) структур, кристаллические решетки фаз которых ориентационно связаны. Пластинчатое строение азотированного слоя сохраняется вплоть до границы с зернами исходной стали (см. рис. 4 д).

Фазовый состав азотированного слоя стали 20Х23Н18 изучали методами микродифракционного анализа, дополняя его темнопольными изображениями структуры.

Рис. 4. Структура стали 20X23H18, подвергнутой азотированию в плазме газового разряда низкого давления; а, б – поверхность азотирования; в, г – анализируемый слой расположен на глубине (5–10) мкм; д – на глубине (50–60) мкм; е – 200 мкм. Параметры азотирования: 873 К, 5 час.

На рис. 5 представлены результаты микродифракционного анализа структуры слоя стали, расположенного на расстоянии 26 мкм от поверхности азотирования.

Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 20X23H18, подвергнутой азотированию в плазме газового разряда низкого давления; а, б – темные поля, полученные в рефлексах $[111]Fe_4N$ и $[002]\gamma-Fe$, соответственно, в – микроэлектронограмма, стрелками указаны рефлекссы, в которых получены темные поля: 1 – (а), 2 – (б). Параметры азотирования: 873 К, 5 час.

Индицирование микроэлектронограммы (см. рис. 5, в) дает основание заключить, что анализируемый участок фольги сформирован γ -фазой (твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки железа) и нитридом железа состава Fe_4N . Темнопольный анализ, выполненный в соответствующих рефлексах, дает основание заключить, что γ -фаза и нитрид железа Fe_4N располагаются параллельными слоями, формируя структуру, подобную структуре пластинчатого перлита в углеродистых сталях. Поперечные размеры прослоек нитрида железа изменяются в пределах (5–7) нм (см. рис. 5 а), поперечные размеры пластин γ -фазы, разделяющих прослойки нитридной фазы, изменяются в пределах (7–10) нм (см. рис. 5 б).

4. Заключение

Показано, что низкотемпературное (723–873 К) азотирование высокохромистой аустенитной стали 20X23H18 в плазме газового разряда низкого давления в течение (1–5) часов приводит к формированию многофазного поверхностного слоя толщиной до 60 мкм, износостойкость которого более чем в 400 раз, а микротвердость в 6,5 раз превышает соответствующие характеристики исходной стали. Выявлено формирование в поверхностном слое толщиной до 10 мкм наноразмерной (15–50 нм) зеренно-субзеренной структуры, суммарная доля нитридов

железа и хрома которой достигает после 5 часов азотирования 90 масс.%. При большем удалении от поверхности образца азотирование стали сопровождается формированием пластинчатой структуры ($\gamma\text{-Fe}/\text{Fe}_4\text{N}$) с поперечным размером пластин (5–10) нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-48-700010).

Библиографический список:

1. **Мамаева, Д.** Индукционные установки ТВЧ для поверхностной закалки крупномодульных зубчатых колес / Д. Мамаева, Ю. Зинин, Ю. Ройзман // Силовая электроника. – 2018. – Т. 6. – № 75. – С. 41-45.
2. **Ivanov, Yu.F.** Microstructure and properties of hypoeutectic silumin treated by high-current pulsed electron beams / Yu.F. Ivanov, D.V. Zagulyaev, S.A. Nevskii, et al. // Progress in Physics of Metals. – 2019. – V. 20. – I. 3. – P. 447-484. DOI: doi.org/10.15407/ufm.20.03.447.
3. **Ivanov, Yu.** Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing / Yu. Ivanov, V. Gromov, D. Zagulyaev, et al. // Materials Letters. – 2019. – V. 253. – P. 55-58. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.05.148.
4. **Кныш, В.В.** Эффективность упрочнения высокочастотной механической проковкой стыковых сварных соединений с длительной наработкой / В.В. Кныш, С.А. Соловей, А.З. Кузьменко // Автоматическая сварка. – 2014. – № 11 (8). – С. 46-49. DOI: 10.15407/tpwj2014.11.08.
5. **Горунов, А.И.** Перспективы применения лазерного упрочнения в авиационной промышленности / А.И. Горунов, М.Р. Шамсиев, А.О. Дронь, А.Х. Гильмутдинов // Образование и наука в России и за рубежом. – 2019. – Т. 58. – № 10. – С. 41-46.
6. **Лопухов, Ю.И.** Ультразвуковое поверхностное пластическое упрочнение стали 14X17H2 / Ю.И. Лопухов, М.А. Лахина // Технические науки - от теории к практике. – 2015. – № 45. – С. 51-59.
7. **Faye, D.N.** Structural and optical studies of aluminosilicate films doped with ($\text{Tb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$) / Yb^{3+} by ion implantation / D.N. Faye, M. Dias, R.E. Rojas-Hernandez, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2019. – V. 459. – P. 71-75. DOI: 10.1016/j.nimb.2019.08.027.
8. **Kuang, X.** The effect of N^+ ion-implantation on the corrosion resistance of HiPIMS- TiN coatings sealed by ALD-layers / X. Kuang, L.L. Lei, W. Guodong, L.K. Huang, Y. Xu // Surface and Coatings Technology. – 2019. – V. 374. – P. 72-82. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.055.
9. **Vorob'ev, V.L.** Nanoscale layers formed on the surface of a titanium alloy by the ion-beam mixing of carbon with a substrate / V.L. Vorob'ev, F.Z. Gilmudtinov, P.V. Bykov, et al. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – V. 13. – I. 5. – P. 979-984. DOI: 10.1134/S1027451019050379.
10. **Арзамасов, Б.Н.** Ионная химико-термическая обработка сплавов в газовых средах / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. – М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 1999. – 400 с.
11. **Meletis, E.I.** Intensified plasma-assisted processing: science and engineering / E.I. Meletis // Surface and Coating Technology. – 2002. – V. 149. – I. 2-3. – P. 95-113.

12. **Берлин, Е.В.** Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е.В. Берлин, Н.Н. Коваль, Л.А. Сейдман. – М.: Техносфера, 2012. – 464 с.
13. **Будилов, В.В.** Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов с использованием тлеющих и вакуумно-дуговых разрядов / В.В. Будилов, Н.Н. Коваль, Р.М. Киреев, К.Н. Рамазанов. – М.: Машиностроение, 2013. – 320 с.
14. **Kubaschewski, O.** Iron binary phase diagrams / O. Kubaschewski. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. – IX, 185 p. DOI: 10.1007/978-3-662-08024-5.
15. **Xu, X.** Phase depth distribution characteristics of the plasma nitrided layer on AISI 304 stainless steel / X. Xu, Z. Yu, L. Wang, J. Qiang, Z. Hei // Surface and Coatings Technology. – 2003. – V. 162. – I. 2-3. – P. 242-247. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00670-9.
16. **Baranowska, J.** Characteristic of the nitride layers on the stainless steel at low temperature / J. Baranowska // Surface and Coatings Technology. – 2004. – V. 180-181. – P. 145-149. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.10.056.
17. **Dudognon, J.** Grazing incidence X-ray diffraction spectra analysis of expanded austenite for implanted stainless steel / J. Dudognon, M. Vayer, A. Pineau, R. Erre // Surface and Coatings Technology. – 2008. – V. 202. – I. 20. – P. 5048-5054. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.05.015.
18. Марочник сталей и сплавов. – 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др.; под общ. ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2014. – 1216 с.

References:

1. **Mamaeva, D.** Induktsionnye ustanovki TVCh dlya poverkhnostnoi zakalki krupnomodul'nykh zubchatykh kolez [Induction installations of HFC for surface hardening of large-modular gears] / D. Mamaeva, Yu. Zinin, Yu. Royzman // Power Electronics. – 2018. – V. 6. – № 75. – P. 41-45. (In Russian).
2. **Ivanov, Yu.F.** Microstructure and properties of hypoeutectic silumin treated by high-current pulsed electron beams / Yu.F. Ivanov, D.V. Zagulyaev, S.A. Nevskii, et al. // Progress in Physics of Metals. – 2019. – V. 20. – I. 3. – P. 447-484. DOI: doi.org/10.15407/ufm.20.03.447.
3. **Ivanov, Yu.** Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing / Yu. Ivanov, V. Gromov, D. Zagulyaev, et al. // Materials Letters. – 2019. – V. 253. – P. 55-58. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.05.148.
4. **Knysh, V.V.** Effectiveness of strengthening butt welded joints after long-term service by high-frequency mechanical peening / V.V. Knysh, S.A. Solovej, A.Z. Kuzmenko // The Paton Welding Journal. – 2014. – I. 11 (8). – P. 42-45. DOI: 10.15407/tpwj2014.11.08.
5. **Gorunov, A.I.** Perspektivy primeneniya lazernogo uprochneniya v aviatsionnoi promyshlennosti [Prospects for the use of laser hardening in the aviation industry] / A.I. Gorunov, M.R. Shamsiev, A.O. Dron, A.Kh. Gilmutdinov // Education and science in Russia and abroad. – 2019. – V. 58. – № 10. – P. 41-46. (In Russian).
6. **Lopuhov, J.** Ul'trazvukovoe poverkhnostnoe plasticheskoe uprochnenie stali 14X17H2 [Ultrasonic finishing processing steel 14X17H2] / J. Lopukhov, M.A. Lakhina // Technical Science - from theory to practice. – 2015. – № 45. – P. 51-59. (In Russian).
7. **Faye, D.N.** Structural and optical studies of aluminosilicate films doped with (Tb^{3+} , Er^{3+})/ Yb^{3+} by ion implantation / D.Nd. Faye, M. Dias, R.E. Rojas-Hernandez, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with

- Materials and Atoms. – 2019. – V. 459. – P. 71-75. DOI: 10.1016/j.nimb.2019.08.027.
8. **Kuang, X.** The effect of N^+ ion-implantation on the corrosion resistance of HiPIMS- TiN coatings sealed by ALD-layers / X. Kuang, L.L. Lei, W. Guodong, L.K. Huang, Y. Xu // Surface and Coatings Technology. – 2019. – V. 374. – P. 72-82. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.055.
9. **Vorob'ev, V.L.** Nanoscale layers formed on the surface of a titanium alloy by the ion-beam mixing of carbon with a substrate / V.L. Vorob'ev, F.Z. Gilmudinov, P.V. Bykov, et al. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – V. 13. – I. 5. – P. 979-984. DOI: 10.1134/S1027451019050379.
10. **Arzamasov, B.N.** Ionная химико-термическая обработка сплавов в газовых средах [Ionic chemical-thermal treatment of alloys in gaseous media] / B.N. Arzamasov, A.G. Bratukhin, Yu.S. Eliseev, T.A. Panajoti. – M.: Bauman Moscow State Technical University Publ., 1999. – 400 p. (In Russian).
11. **Meletis, E.I.** Intensified plasma-assisted processing: science and engineering / E.I. Meletis // Surface and Coating Technology. – 2002. – V. 149. – I. 2-3. – P. 95-113.
12. **Berlin, E.V.** Плазмённая химико-термическая обработка поверхности сталёвых деталей [Plasma chemical-thermal treatment of the surface of steel components] / E.V. Berlin, N.N. Koval', L.A. Seidman. – M.: Tekhnosfera, 2012. – 464 p. (In Russian).
13. **Budilov, V.V.** Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов с использованием тлеющих и вакуумно-дуговых разрядов [Integrated methods of processing structural and tool materials using glow and vacuum-arc discharges] / V.V. Budilov, N.N. Koval', R.M. Kireev, K.N. Ramzanov. – M.: Mashinostroenie, 2013. – 320 p. (In Russian).
14. **Kubaschewski, O.** Iron binary phase diagrams / O. Kubaschewski. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. – IX, 185 p. DOI: 10.1007/978-3-662-08024-5.
15. **Xu, X.** Phase depth distribution characteristics of the plasma nitrided layer on AISI 304 stainless steel / X. Xu, Z. Yu, L. Wang, J. Qiang, Z. Hei // Surface and Coatings Technology. – 2003. – V. 162. – I. 2-3. – P. 242-247. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00670-9.
16. **Baranowska, J.** Characteristic of the nitride layers on the stainless steel at low temperature / J. Baranowska // Surface and Coatings Technology. – 2004. – V. 180-181. – P. 145-149. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.10.056.
17. **Dudognon, J.** Grazing incidence X-ray diffraction spectra analysis of expanded austenite for implanted stainless steel / J. Dudognon, M. Vayer, A. Pineau, R. Erre // Surface and Coatings Technology. – 2008. – V. 202. – I. 20. – P. 5048-5054. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.05.015.
18. Марочник стали и сплавов [Grades of steels and alloys]. – 4-th ed., rev. and suppl. / Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko, Yu.V. Kashirskij, et al.; Ed. by Yu.G. Dragunova and A.S. Zubchenko. – M.: Mashinostroenie, 2014. – 1216 p. (In Russian).

Original paper

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER HIGH CHROME
AUSTENITIC STEEL, SUBMITTED TO ION-PLASMA NITROGEN**

Yu.F. Ivanov, E.A. Petrikova, S.V. Lykov, Yu.A. Denisova, O.S. Tolkachev

Institute of High Current Electronics SB RAS

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.805

Abstract: Ion nitriding is one of the most common methods of surface hardening of parts and tools. The purpose of this work is to identify and analyze the laws governing the transformation of the

structure and properties of the surface layer of high-chromium stainless steel subjected to low-temperature nitriding in a low-pressure gas discharge plasma. It was found that the saturation with nitrogen (793 K, 3 hours) of austenitic high-chromium steel 20X23H18 in a low-pressure gas discharge plasma is accompanied by the formation of a plate type structure with alternating plates of austenite and iron nitride in a layer (55 – 60) μm thick (transverse plate sizes do not exceed 10 nm), the microhardness and wear resistance of which exceed the microhardness of the initial state by 6,5 times, wear resistance – more than 400 times.

Keywords: low pressure gas discharge plasma, austenitic steel, phase composition, defective substructure, microhardness, wear resistance

Иванов Юрий Федорович – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Петрикова Елизавета Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Лыков Сергей Витальевич – главный специалист, Группа инновационной деятельности и интеллектуальной собственности, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН».

Денисова Юлия Александровна – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН».

Тересов Антон Дмитриевич – научный сотрудник лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Толкачев Олег Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Yury F. Ivanov – Dr. Sc., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Elizaveta A. Petrikova – Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Sergey V. Lykov - Chief Specialist, Group of innovative activities and intellectual property Institute of High Current Electronics SB RAS.

Julia A. Denisova - Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Beam-Plasma Surface Engineering, Institute of High Current Electronics SB RAS.

Anton D. Teresov – Researcher of the Laboratory of Beam-Plasma Surface Engineering, Institute of High Current Electronics SB RAS

Oleg S. Tolkachev – Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Поступила в редакцию/received: 1.06.2020; после рецензирования/revised: 20.06.2020; принята/accepted 1.07.2020.