

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.785.532

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-82-90



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНОГО ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ

Хусаинов Ю.Г.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Аннотация. В работе предложены и исследованы три перспективных способа реализации локального ионного азотирования сталей широкого класса 16ХЗНВФМБ-Ш, 38ХМЮА, Р6М5, 12Х18Н10Т и 13Х11Н2В2МФ-Ш, позволяющие формировать на обрабатываемой поверхности за один вакуумный цикл диффузионные слои, различные по толщине и механическим свойствам. Первый способ основан на создании плазмы повышенной плотности на участках деталей с помощью эффекта полого катода. Второй способ предполагает создание высокоионизированной плазмы тлеющего разряда с помощью скрещенных электрических и магнитных полей на локальных участках деталей. Увеличение толщины диффузионного слоя на локальных участках при ионном азотировании связано с увеличением градиента концентрации насыщающего элемента в полости, образуемой полым катодом или скрещенными электрическими и магнитными полями. Третий способ реализуется путем измельчения структуры материала методами пластической деформации перед процессом азотирования на участках деталей, подверженных интенсивному износу. В результате измельчения структуры на локальных участках деталей машин и механизмов интенсифицируются диффузионные процессы и образуются износостойкие упрочненные слои. В статье исследованы микроструктуры сталей после локального ионного азотирования предложенными способами, а также приведены результаты замеров микротвердости упрочненного слоя на различных обрабатываемых участках. Установлено, что при ионном азотировании с полым катодом или в скрещенных электрических и магнитных полях с помощью плазмы тлеющего разряда повышенной плотности на локальном участке детали формируется диффузионный слой в 2–2,5 раза больше, чем при классическом ионном азотировании. При ионном азотировании деталей с предварительным измельчением структуры материала методами пластической деформации перед процессом диффузионного насыщения на отдельных участках детали формируются диффузионные слои, толщиной в ~2 раза превышающие соответствующий показатель, получаемый при азотировании деталей с неизменной структурой. Исследуемые способы позволят обрабатывать высоконагруженные детали машин и механизмов, работающие в условиях локального износа.

Ключевые слова: локальное ионное азотирование, тлеющий разряд, эффект полого катода, электрические скрещенные и магнитные поля, сталь, структура, микротвердость, упрочненный слой.

© Хусаинов Ю.Г., 2022

Для цитирования

Хусаинов Ю.Г. Перспективные способы реализации локального ионного азотирования сталей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 82–90. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-82-90>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROMISING METHODS FOR LOCAL ION NITRIDING OF STEELS

Khusainov Yu.G.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Abstract. The paper describes studies on three proposed promising methods for local ion nitriding of steels of a wide class: 16Kh3NVFMB-Sh, 38KhMYuA, R6M5, 12Kh18N10T and 13Kh11N2V2MF-Sh, to create diffusion layers with different thickness and mechanical properties on the treated surface in one vacuum cycle. The first method is based on creating high-density plasma on sections of parts, using the effect of a hollow cathode. The second method proposes the creation of highly ionized glow discharge plasma, using crossed electric and magnetic fields on the local sections of parts. Increase in diffusion layer thickness in local areas during ion nitriding is attributed to an increase in the concentration gradient of a saturating element in the chamber formed by a hollow cathode or crossed electric and magnetic fields. The third method is implemented by refining a material structure by plastic deformation methods before the nitriding process on the areas of high-wear parts. As a result of such structure refinement, local areas of machine parts and mechanisms show intensified diffusion processes and formed wear-resistant hardened layers. The paper presents research on microstructures of steels after local ion nitriding with the proposed methods, and microhardness measurements of the hardened layer on the various treated areas. It has been found that during ion nitriding with a hollow cathode or in crossed electric and magnetic fields, using high-density glow discharge plasma, the local area of the part shows the formation of a diffusion layer, which is 2–2.5 times larger than during classical ion nitriding. Ion nitriding of parts with a preliminary refinement of the material structure with plastic deformation methods before the diffusion saturation process contributes to forming in individual sections of the part diffusion layers, which are ~ 2 times thicker than the relevant indicator, achieved during nitriding of parts with an unchanged structure. The methods under study will provide for processing heavy-loaded parts of machines and mechanisms, operating under local wear conditions.

Keywords: local ion nitriding, glow discharge, hollow cathode effect, crossed electric and magnetic fields, steel, structure, microhardness, hardened layer.

For citation

Khusainov Yu.G. Promising Methods for Local Ion Nitriding of Steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 82–90. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-82-90>

Введение

Известно, что подавляющая часть разрушений деталей машин, работающих в условиях трения и циклических нагрузок, начинается с поверхности материала вследствие образования на ней питтингов и микроскопических трещин [1]. Повысить надежность и долговечность таких деталей позволяют методы поверхностного упрочнения, в частности ионное азотирование. Публикации последних лет свидетельствуют, что азотирование в плазме тлеющего разряда является одним из наиболее эффективных методов модифицирования поверхности, который все шире применяется в промышленно развитых странах. Как показывает практика, ионное азотирование применяется для деталей машиностроения, основной причиной разрушения которых является износ поверхности материала [2].

Ионное азотирование имеет ряд преимуществ перед традиционными методами, такими как газовое азотирование, азотирование в жид-

ких средах и др.: возможность получения диффузионного слоя с заданным фазовым составом и высоким классом чистоты поверхности, обработка пассивирующихся материалов без дополнительной депассивирующей обработки, а также экономичность и экологичность процесса [3].

Зачастую при эксплуатации деталей машин и механизмов интенсивному износу подвергаются только отдельные высоконагруженные участки, к примеру контактная поверхность зубьев шестерен и зубчатых колес, место посадки под подшипник на валу и др. [4]. В этих случаях более целесообразно упрочнить лишь рабочую поверхность детали.

Таким образом, проблема локального азотирования на современном этапе развития машиностроения является весьма актуальной. В данной работе предложены три способа локального упрочнения наиболее подверженных износу участков деталей за счет формирования на обрабатываемой поверхности за один вакуумный цикл диффузионных слоев, различных по тол-

щине и механическим свойствам. Также это позволит снизить себестоимость технологической операции азотирования вследствие сокращения длительности процесса обработки и уменьшения энергозатрат.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на модернизированной многофункциональной установке для проведения процессов термической и химико-термической обработки в вакууме ЭЛУ-5М. Локальному ионному азотированию с полым катодом подвергались образцы из сталей мартенситного 16ХЗНВФМБ-Ш и перлитного 38ХМЮА классов, предварительно термообработанные (закалка и высокий отпуск при 600°C), применяемые для изготовления высоконагруженных зубчатых колес, шестерней, валов. В процессе локального ионного азотирования с полым катодом часть образца располагалась под технологическим экраном-сеткой (рис. 1). В полости, образуемой между экраном и деталью, проявлялся эффект полого катода в виде интенсивного свечения [5]. В течение всего процесса азотирования давление составляло $P = 60$ Па, температура поверхности обрабатываемых образцов не превышала $T \approx 550^\circ\text{C}$. Обработка проводилась в течение $t = 12$ ч.

Локальному ионному азотированию в скрещенных электрических и магнитных полях подвергались образцы из стали мартенситного класса Р6М5, предварительно термообработанные (закалка и однократный отпуск при 560°C), применяемые для изготовления штампового инструмента и оснастки [6].

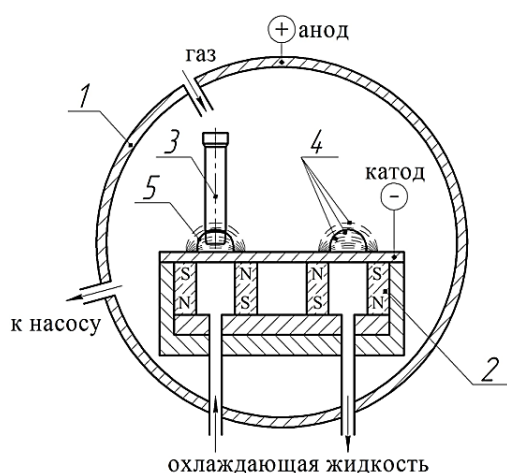


Рис. 2. Принципиальная схема проведения экспериментов локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях: 1 – вакуумная камера; 2 – магнитная система; 3 – деталь; 4 – силовые линии магнитного поля; 5 – область плазмы повышенной плотности

Fig. 2. Schematic diagram of the local ion nitriding experiments in crossed electric and magnetic fields: 1 is a vacuum chamber; 2 is a magnetic system; 3 is a part; 4 are magnetic field lines; 5 is a high-density plasma region

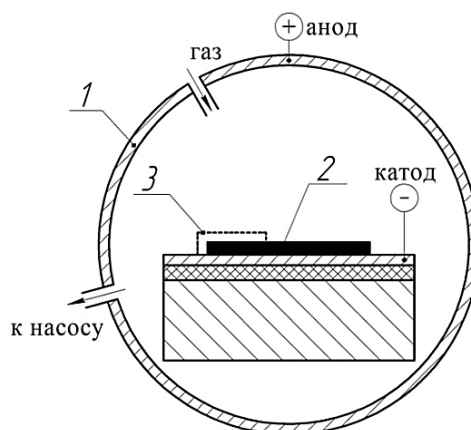
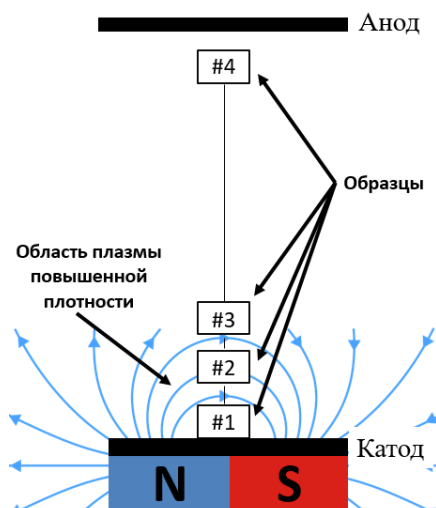


Рис. 1. Принципиальная схема проведения эксперимента локального ионного азотирования с полым катодом: 1 – вакуумная камера; 2 – образец; 3 – технологический экран для создания эффекта полого катода

Fig. 1. Schematic diagram of the local ion nitriding experiment with a hollow cathode: 1 is a vacuum chamber; 2 is a sample; 3 is a technological screen to create the hollow cathode effect

В процессе локальной обработки образцы были расположены на определенном расстоянии от магнитной системы №1 – 0 мм, №2 – 12 мм, №3 – 20 мм и №4 – 60 мм (рис. 2).

Локальному ионному азотированию с предварительно измельченной структурой (рис. 3) подвергались образцы из сталей 13Х11Н2В2МФ-Ш и 12Х18Н10Т [7]. В результате измельчения структуры на локальных участках деталей машин и механизмов интенсифицируются диффузионные процессы и образуются износостойкие упрочненные слои [8].



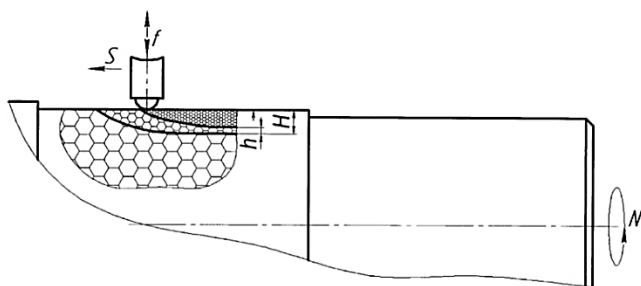


Рис. 3. Принципиальная схема создания измельченной структуры на поверхности материала перед процессом ионного азотирования

Fig. 3. Schematic diagram of forming a refinement structure on the surface of the material before the ion nitriding process

Исследование микроструктуры упрочненного слоя проводились с помощью оптического микроскопа Zeiss Axiotech 25HD. Для выявления структуры азотированного слоя образцы химически травили 5%-м HNO_3 и 95%-м $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Замеры микротвердости поверхности выполнялись на микротвердометре Struers Duramin-1/-2.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 4 показаны фотографии микроструктуры образцов из сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА после локального ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом. Локальное азотирование проводили при $T = 550^\circ\text{C}$, $P = 60$ Па, $U = 500$ В, $t = 12$ ч, $h = 5$ мм.

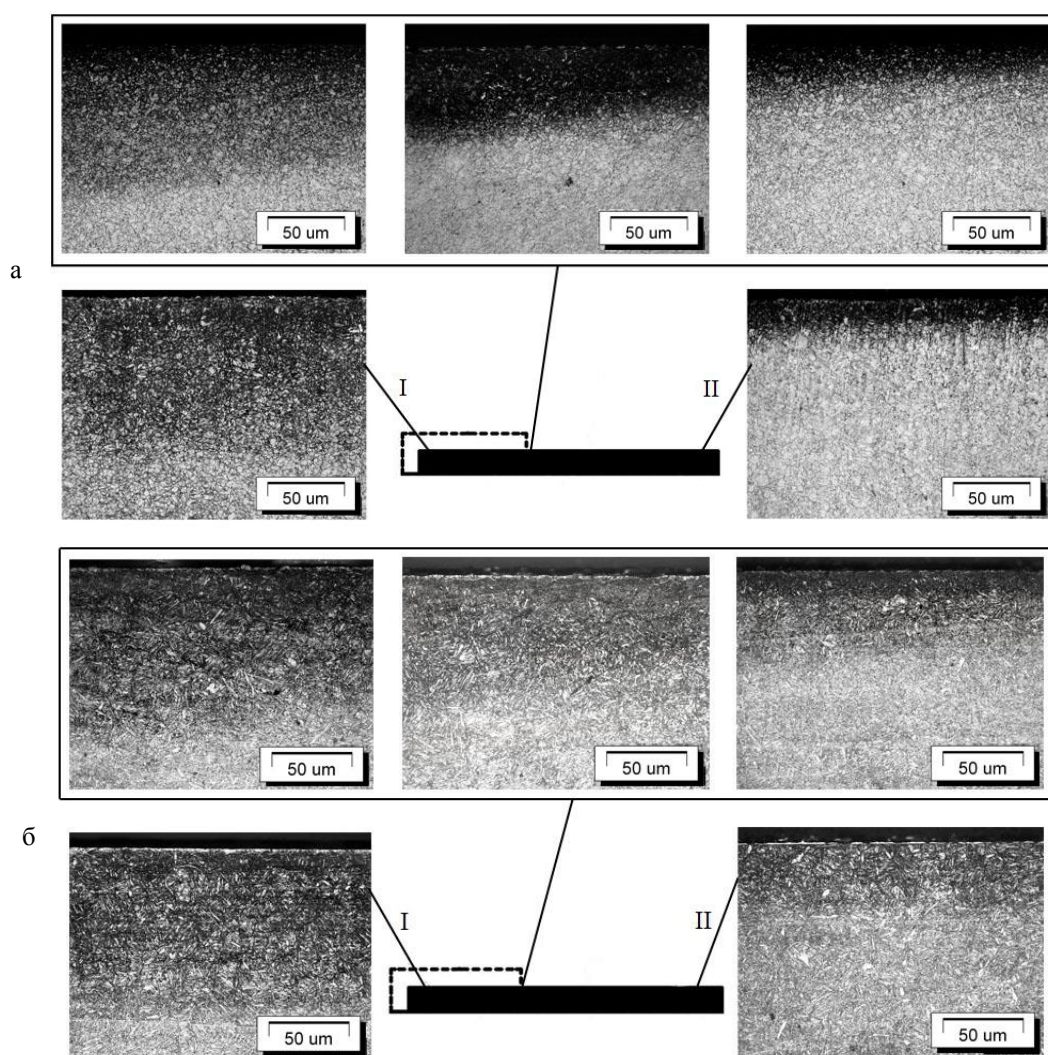


Рис. 4. Микроструктура сталей 16ХЗНВФМБ-Ш (а) и 38ХМЮА (б) после локального ионного азотирования с полым катодом при $T=550^\circ\text{C}$, $P=60$ Па, $U=500$ В, $t=12$ ч, $h=5$ мм: I – азотирование с экраном; II – азотирование без экрана

Fig. 4. Microstructure of steels 16Kh3NVFMB-Sh (a) and 38KhMYuA (b) after local ion nitriding with a hollow cathode at $T=550^\circ\text{C}$, $P=60$ Pa, $U=500$ V, $t=12$ h, $h=5$ mm: I is nitriding with a screen; II is nitriding without a screen

Исследование микроструктур образцов из сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА после локального ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом показало наличие двух темных диффузионных зон различной толщины: I – находившаяся под технологическим экраном; II – вне технологического экрана.

Из рис. 4 видно, что для конструкционных сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА на участках ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом толщина темного сильно травящегося слоя в 2–2,5 раза больше по сравнению с участками ионного азотирования, находившимися вне технологического экрана при температуре поверхности 550°C и длительности процесса 12 ч. Такое увеличение толщины диффузионного слоя на участках ионного азотирования с полым катодом связано с увеличением градиента концентрации насыщающего элемента в полости, образуемой технологическим экраном-сеткой и катодом.

Максимальный размер переходной зоны для сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА достигал 3 мм. Переход между двумя зонами плавный, о чем свидетельствует постепенное изменение толщины темной диффузионной зоны.

Анализ структуры локально азотированных участков с полым катодом показывает наличие

темной диффузионной зоны, размер которой меняется в зависимости от технологических параметров тлеющего разряда. Диффузионная зона представляет собой α -фазу – азотистый феррит с ОЦК-решеткой, период решетки меняется в зависимости от содержания азота [9]. Переход от азотированного слоя к нижележащим слоям плавный, что является одним из основных требований к микроструктуре стали [10].

Измерения микротвердости на поперечных шлифах азотированных образцов из конструкционных сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА позволили оценить глубину диффузионного слоя при локальном ионном азотировании в тлеющем разряде с полым катодом. На рис. 5, 6 приведены зависимости распределения микротвердости по глубине диффузионного слоя для сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА на участках I и II при длительности обработки $t=12$ ч.

Анализ зависимостей распределения микротвердости для сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА показывает, что на участке ионного азотирования с технологическим экраном толщина диффузионного слоя в 2–2,5 раза больше по сравнению с участком азотированного без экрана при температуре поверхности $T=550^\circ\text{C}$ и длительности обработки $t=12$ ч.

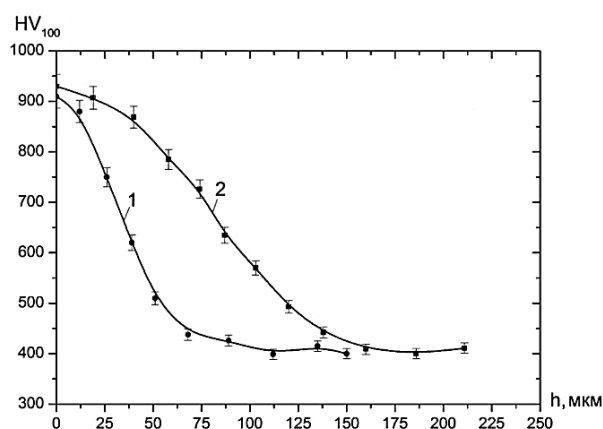


Рис. 5. Зависимости распределения микротвердости по толщине диффузионного слоя при локальном ионном азотировании в тлеющем разряде с полым катодом для стали 16ХЗНВФМБ-Ш при $T=550^\circ\text{C}$, $P=60$ Па, $U=500$ В, $t=12$ ч: 1 – азотирование без экрана; 2 – азотирование с экраном

Fig. 5. Dependences of the distribution of microhardness over thickness of the diffusion layer during local ion nitriding in a glow discharge with a hollow cathode for steel 16Kh3NVFMB-Sh at $T=550^\circ\text{C}$, $P=60$ Pa, $U=500$ V, $t=12$ h: 1 is nitriding without a screen; 2 is nitriding with a screen

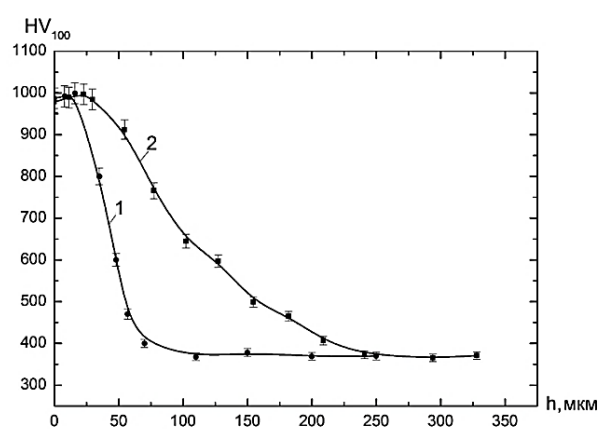


Рис. 6. Зависимости распределения микротвердости по толщине диффузионного слоя при локальном ионном азотировании в тлеющем разряде с полым катодом для стали 38ХМЮА при $T=550^\circ\text{C}$, $P=60$ Па, $U=500$ В, $t=12$ ч: 1 – азотирование без экрана; 2 – азотирование с экраном

Fig. 6. Dependences of the distribution of microhardness over the thickness of the diffusion layer during local ion nitriding in a glow discharge with a hollow cathode for steel 38KhMYuA at $T=550^\circ\text{C}$, $P=60$ Pa, $U=500$ V, $t=12$ h: 1 is nitriding without a screen; 2 is nitriding with a screen

Так, для стали 16ХЗНВФМБ-Ш толщина упрочненного слоя на участках ионного азотирования с полым катодом составляет 140 мкм, а для стали 38ХМЮА – 240 мкм.

Структура стали Р6М5 после локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях представлена на **рис. 7**. На микроструктуре образцов наблюдается темная диффузионная зона, представляющая собой α -фазу – азотистый феррит с ОЦК-решеткой, причем с увеличением расстояния расположения образца от магнита глубина азотированного слоя уменьшается [2]. Переход от азотированного слоя к основе (матрице) материала плавный, что является одним из основных требований к микроструктуре азотированной стали [10].

Измерения микротвердости по глубине диффузионной зоны проводили на поперечном шлифе образцов. Результаты измерений сведены в **таблицу**.

При азотировании в скрещенных электрических и магнитных полях достигается максимальная глубина азотированного слоя при расположении образца непосредственно на магните (0 мм). С увеличением расстояния от магнита глубина азотированного слоя уменьшается. Использование скрещенных электрических и магнитных полей при ионном азотировании приводит к интенсификации процесса диффузии и обеспечивает высокую эффективность процесса по сравнению с обычным методом азотирования.

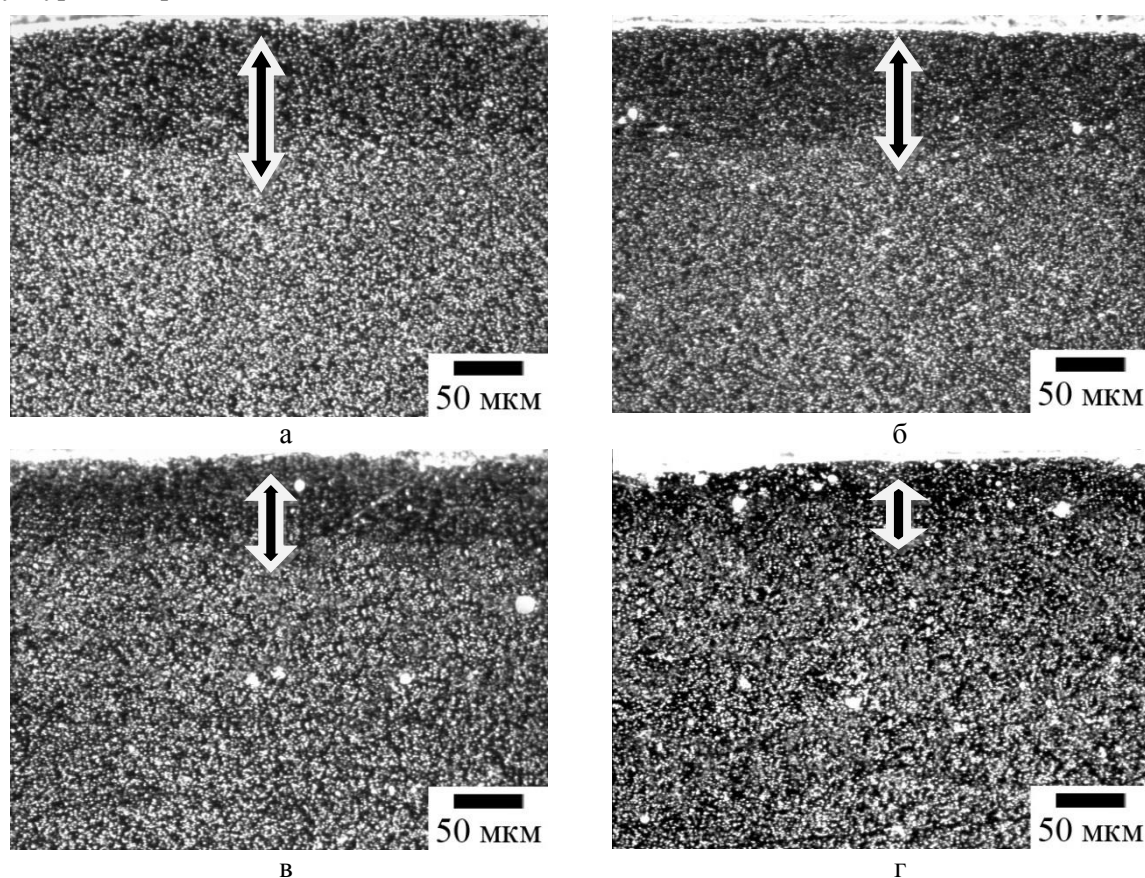


Рис. 7. Микроструктура стали Р6М5 после локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях: а – 0 мм; б – 12 мм; в – 20 мм; г – 60 мм

Fig. 7. Microstructure of R6M5 steel after local ion nitriding in crossed electric and magnetic fields: а is 0 mm; б is 12 mm; в is 20 mm; г is 60 mm

Таблица. Механические свойства образцов из стали Р6М5 после локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях

Table. Mechanical properties of R6M5 steel specimens after local ion nitriding in crossed electric and magnetic fields

Расстояние от магнитной системы, мм	0	12	20	60
Микротвердость азотированного слоя, HV	1076,9±10	747,6±10	746,9±10	709,5±10
Глубина азотированного слоя, мкм	100±5	70±5	50±5	40±5

Структура стали 12X18H10T после локального ионного азотирования представлена на рис. 8.

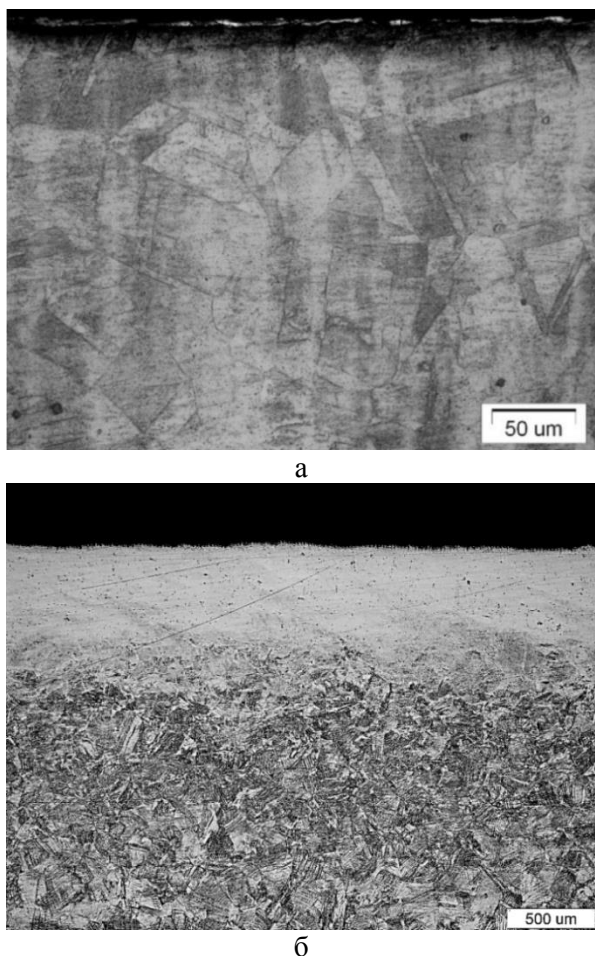


Рис. 8. Микроструктура стали 12X18H10T после локального ионного азотирования:
а – исходное термообработанное состояние;
б – после поверхностного измельчения зеренной структуры материала

Fig. 8. Microstructure of steel 12Kh18N10T after local ion nitriding: а is an initial heat-treated state;
б is after surface refinement of the grain structure of the material

Сталь 12X18H10T из-за высокого содержания хрома считается трудноазотируемой сталью. При этом для сохранения коррозионно-стойких свойств рекомендуется проводить обработку при температуре ниже 470°C. С целью интенсификации диффузионных процессов при таких низких температурах образцы были подвергнуты поверхностному измельчению зеренной структуры материала (см. рис. 8).

Для определения глубины упрочненного слоя были получены распределения микротвердости в поперечном сечении азотированных образцов (рис. 9). Анализ показал, что на всех образцах,

прошедших азотирование, с увеличением расстояния от поверхности значение твердости постепенно снижается, что вызвано уменьшением концентрации растворенного азота в γ -фазе для стали 12X18H10T [2]. При этом распределение твердости по глубине диффузионного слоя на образцах, прошедших поверхностное измельчение структуры, имеет более плавный характер. Размер упрочненной зоны образца после поверхностной обработки в ~2 раза больше, чем образца в исходном термообработанном состоянии.

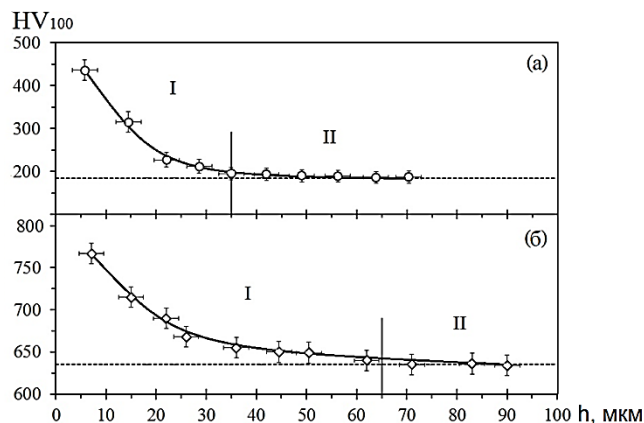


Рис. 9. Распределения микротвердости по глубине азотированных образцов из стали 12X18H10T:
а – исходное термообработанное состояние;
б – после поверхностного измельчения зеренной структуры материала;
I – упрочненная зона, II – сердцевина

Fig. 9. Depth distributions of microhardness of nitride specimens of steel 12Kh18N10T: а is an initial heat-treated state; б is after surface refinement of the grain structure of the material;
I is a hardened zone; II is a core

Заклучение

Таким образом, впервые предложены и исследованы следующие перспективные способы локального ионного азотирования, позволяющие формировать на обрабатываемой поверхности за один вакуумный цикл диффузионные слои, различные по толщине и механическим свойствам:

1. Способ локального ионного азотирования с полым катодом, позволяющий формировать с помощью плазмы тлеющего разряда повышенной плотности на участке детали диффузионный слой в 2–2,5 раза больше, чем при классическом ионном азотировании.

2. Способ локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях, позволяющий получать на отдельных участках детали диффузионный слой в 2–2,5 раза больше, чем при классическом ионном азотировании.

3. Способ локального ионного азотирования с предварительным измельчением структуры материала методами пластической деформации перед процессом азотирования на участках деталей, подверженных интенсивному износу. Способ позволяет получать упрочненные слои на отдельных участках детали, толщиной в ~2 раза превышающие соответствующий показатель, получаемый при ионном азотировании деталей с неизменной структурой.

Список литературы

1. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов: монография. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 518 с.
2. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
3. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М.: Техносфера, 2012. 464 с.
4. Повышение ресурса работы зубчатых передач на основе выбора технологий упрочнения рабочих поверхностей зубьев / Л.И. Куксенова, С.А. Поляков, М.С. Алексеева, С.В. Рубцов // Вестник научно-технического развития. 2019. №5. С. 11–22.
5. Пат. № 2534906 RU, МПК7 C23C8/36. Способ локальной обработки материала с эффектом полого катода при ионном азотировании / В.В. Будиллов, К.Н. Рамазанов, Ю.Г. Хусаинов, И.С. Рамазанов, И.В. Золотов; патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГАТУ». №2013117842; заявл. 17.04.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. №34 с.: ил.
6. Пат. №2640703 RU, МПК7 C23C8/36. Способ локальной обработки стального изделия при ионном азотировании в магнитном поле / В.В. Будиллов, К.Н. Рамазанов, Ю.Г. Хусаинов, Р.С. Есипов, И.В. Золотов, Р.Д. Агзамов; патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГАТУ». №2016110289; заявл. 21.03.16; опубл. 11.01.2018; Бюл. №2 с.: ил.
7. Пат. №2664106 RU, МПК7 C23C8/36. Способ низкотемпературного ионного азотирования стальных деталей / В.В. Будиллов, К.Н. Рамазанов, Ю.Г. Хусаинов, Р.Д. Агзамов, Р.С. Есипов, А.Ф. Тагиров; патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГАТУ». №2017100450; заявл. 09.01.17; опубл. 10.07.2018; Бюл. № 19 с.: ил.
8. Структура и свойства ультрамелкозернистых сталей с ионно-плазменными покрытиями / Р.К. Исламгалиев, К.Н. Рамазанов, М.В. Караваева и др. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2017. 225 с.
9. Будиллов В.В., Агзамов Р.Д., Рамазанов К.Н. Исследование и разработка методов химико-термической обработки на основе структурно фазового модифицирования поверхности деталей высокопрочными разрядами в вакууме // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. №7. С. 33–36.
10. Будиллов В.В., Рамазанов К.Н., Вафин Р.К. Влияние скрещенных электрических и магнитных полей на ионное азотирование в тлеющем разряде // Физика и химия обработки материалов. 2011. №6. С. 40–42.

References

1. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. *Struktura i iznosostoykost azotirovannykh konstruktivnykh staley i splavov: monografiya* [Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys: monograph]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2012, 518 p. (In Russ.)
2. Arzamasov B.N., Bratukhin A.G., Eliseev Yu.S., Panayoti T.A. *Ionnaya khimiko-termicheskaya obrabotka splavov* [Ion chemical-thermal treatment of alloys]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 1999, 400 p. (In Russ.)
3. Berlin E.V., Koval N.N., Seidman L.A. *Plazmennaya khimiko-termicheskaya obrabotka poverkhnosti stalnykh detaley* [Plasma chemical-thermal treatment of the surface of steel parts]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 464 p. (In Russ.)
4. Kuksenova L.I., Polyakov S.A., Alekseeva M.S., Rubtsov S.V. Increasing the service life of gears based on the choice of technologies for strengthening the working surfaces of the teeth. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Scientific and Technical Development], 2019, no. 5, pp. 11–22. (In Russ.)
5. Budilov V.V., Ramazanov K.N., Khusainov Yu.G., Ramazanov I.S., Zolotov I.V. *Sposob lokalnoy obrabotki materiala s efektom pologo katoda pri ionnom azotirovanii* [The method of local processing of the material with the hollow cathode effect during ion nitriding]. Patent RU, no. 2534906, 2014.
6. Budilov V.V., Ramazanov K.N., Khusainov Yu.G., Esipov R.S., Zolotov I.V., Agzamov R.D. *Sposob lokalnoy obrabotki stalnogo izdeliya pri ionnom azotirovanii v magnitnom pole* [The method of local processing of a steel product during ion nitriding in a magnetic field]. Patent No. 2640703, 2018.
7. Budilov V.V., Ramazanov K.N., Khusainov Yu.G., Agzamov R.D., Esipov R.S., Tagirov A.F. *Sposob nizkotemperaturnogo ionnogo azotirovaniya stalnykh detaley* [The method of low-temperature ion nitriding of steel parts]. Patent No. 2664106 RU, 2018.
8. Islamgaliev R.K., Ramazanov K.N., Karavaeva M.V. et al. *Struktura i svoystva ultramelkozernistykh staley s ionno-plazmennymi pokrytiyami* [Structure and properties of ultrafine-grained steels with ion-plasma coatings]. Moscow: Innovative Mechanical Engineering Publishing House, 2017, 225 p. (In Russ.)
9. Budilov V.V., Agzamov R.D., Ramazanov K.N. Research and development of methods of chemical-thermal

treatment based on structural phase modification of the surface of parts by high-current discharges in vacuum. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 2007, no. 7, pp. 33–36. (In Russ.)

10. Budilov V.V., Ramazanov K.N., Vafin R.K. Influence of crossed electric and magnetic fields on ion nitriding in a glow discharge. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 2011, no. 6, pp. 40–42. (In Russ.)

Поступила 11.05.2022; принята к публикации 25.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 11/05/2022; revised 25/05/2022; published 28/06/2022

Хусаннов Юлдаш Гамирович – кандидат технических наук, директор института авиационных технологий и материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.
Email: uldash990@mail.ru. ORCID 0000-0002-0423-8257

Yuldash G. Khusainov – PhD (Eng.), Director of the Institute of Aviation Technologies and Materials, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.
Email: uldash990@mail.ru. ORCID 0000-0002-0423-8257