

УДК 621.785.532

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА ПОЛОГО КАТОДА ПРИ ЛОКАЛЬНОМ АЗОТИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 16ХЗНВФМБ-Ш

В. В. Будилов¹, К. Н. Рамазанов², Ю. Г. Хусаинов³, И. В. Золотов⁴

¹vipt127@mail.ru, ²kamram@rambler.ru, ³uldash990@mail.ru, ⁴zolotov.ugatu@gmail.com
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 05.10.2013

Аннотация. Проведено исследование влияния эффекта полого катода (ЭПК) на процесс ионного азотирования стали 16ХЗНВФМБ-Ш. Проведено зондовое исследование плазмы тлеющего разряда и получены распределения плотностей заряженных частиц. Исследованы диапазоны давлений и напряжений, при которых проявляется ЭПК при азотировании на модернизированной установке ЭЛУ-5. Получены и исследованы микроструктуры поверхностного слоя, а также поверхностная микротвердость образцов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш, прошедших ионное азотирование с применением ЭПК и без него.

Ключевые слова: ионное азотирование; тлеющий разряд; локальная обработка; зондовые измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно [1, 2], что подавляющая часть разрушений деталей машин начинается на поверхности и в поверхностных слоях материала. Действительно, поверхностные слои материала при их эксплуатации нагружены более интенсивно, чем его внутренние объемы. Так же следует отметить, что в большинстве случаев при эксплуатации детали на нагрузке подвергаются только отдельные участки ее поверхности, например контактная поверхность зубьев зубчатого колеса. В таких случаях нет необходимости упрочнять всю поверхность детали, а достаточно лишь обработать ее рабочую поверхность. Поэтому в повышении ресурса работы деталей машин наибольшую актуальность приобретают методы локального поверхностного упрочнения.

Анализ современной литературы показал, что из всего многообразия методов поверхностного упрочнения ионное азотирование является одним из наиболее распространенных методов структурно-фазового модифицирования, использование которого в промышленно развитых странах постоянно расширяется. Как показывает практика, применение азотирования особенно эффективно для деталей, где основной причиной разрушения поверхностей является износ [3]. Преимуществом ионного азотирования перед традиционными методами (газовое, в

жидких средах и т. д.) является: высокая скорость насыщения; получение диффузионных слоев заданного фазового состава и строения; высокий класс чистоты поверхности; возможность азотирования пассивирующихся материалов без дополнительной депассивирующей обработки; большая экономичность процесса за счет увеличения коэффициента использования электроэнергии и сокращения расхода насыщающих газов; экологичность процесса [4, 5].

В работах Ю. Е. Крейнделя, Н. М. Лемешева, А. И. Слосмана, В. В. Будилова, Р. Д. Агзамова, К. Н. Рамазанова и др. экспериментально было доказано, что при ионном азотировании в тлеющем разряде повышенной плотности (с использованием ЭПК) скорость диффузионного насыщения существенно выше по сравнению с обработкой в традиционном тлеющем разряде [6, 7].

В данной работе исследуется ЭПК и его влияние на процесс ионное азотирование конструкционной стали 16ХЗНВФМБ-Ш.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования характеристик плазмы тлеющего разряда при азотировании применялся зондовый метод. Измерения производились по схеме одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра [8] (рис. 1).

Зондовые измерения проводились при давлении 133 Па в среде аргона, расстояние между

катодом и сеткой 5 мм. Электрическая схема установки для зондовых измерений показана на рис. 2.

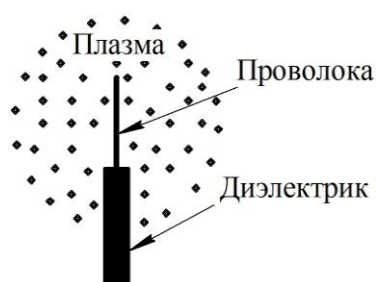


Рис. 1. Схема цилиндрического зонда

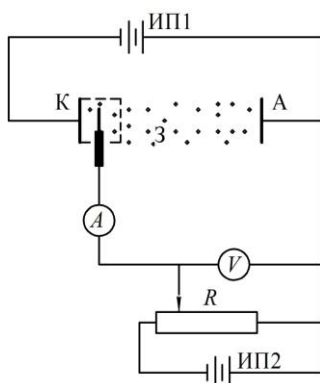


Рис. 2. Схема зондового измерения:

К – катод, А – анод, 3 – одиночный цилиндрический зонд, ИП1 – источник питания разряда, ИП2 – регулируемый источник напряжения смещения зонда

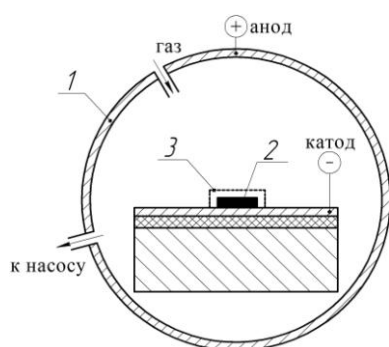


Рис. 3. Схема проведения эксперимента:

1 – вакуумная камера, 2 – образец, 3 – экран для создания ЭПК

Исследования проводились на модернизированной установке ЭЛУ-5 с нагревом обрабатываемой поверхности энергией плазмы тлеющего разряда (рис. 3). Эксперименты по влиянию ЭПК на процесс ионного азотирования проводились на предварительно термообработанных (закалка с 930°C и высокий отпуск при 600°C) образцах из стали 16ХЗНВФМБ-Ш. Предварительная ионная очистка производилась в течение 15 мин при $P = 10$ Па в среде аргона,

температура поверхности не превышала $T = 250^{\circ}\text{C}$. Процесс диффузионного насыщения проходил в смеси азота, аргона и ацетилена ($N_2 70\%$, $Ar 25\%$, $C_2H_2 5\%$). Образцы азотировались в тлеющем разряде при температуре $T = 550 \pm 10^{\circ}\text{C}$ с ЭПК и без него. Обработка проводилась в течение $t = 6$ ч.

Исследование микроструктуры упрочненного слоя проводилось с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51. Для создания оптического контраста образцы химически травились смесью, содержащей 5% HNO_3 и 95% C_2H_5OH . Замеры микротвердости поверхности выполнялись на микротвердомере Micromet-5101.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для выбора оптимальных технологических параметров ионного азотирования с ЭПК был проведен ряд экспериментов, направленных на определение диапазонов давления и напряжения, при которых проявляется данный эффект. На основании полученных данных была построена диаграмма, изображенная на рис. 4. Анализ результатов показал, что диапазон давлений, при которых возможна обработка с ЭПК, увеличивается с ростом напряжения горения разряда, преимущественно за счет увеличения верхней границы. Данный факт позволяет выбирать режимы обработки таким образом, чтобы минимизировать расход насыщающих газов.

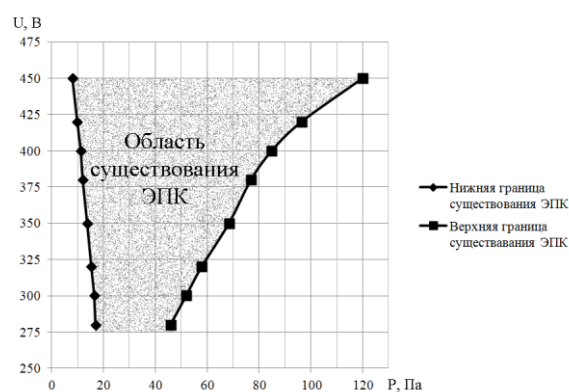


Рис. 4. Область существования ЭПК

В результате обработки зондовых вольтамперных характеристик получили распределение концентрации ионов внутри полости, образованной поверхностью катода и технологической сеткой (рис. 5). В центре катодной полости наблюдается максимум концентрации ионов, составляющий $n_i = 3,5 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$. В тлеющем разряде без полого катода концентрация ионов на таком же расстоянии составила $n_i = 2 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

Таким образом, использование ЭПК позволило значительно повысить концентрацию ионов вблизи поверхности катода (детали). Согласно [5], увеличение концентрации ионов вблизи обрабатываемой поверхности ведет к увеличению скорости насыщения.

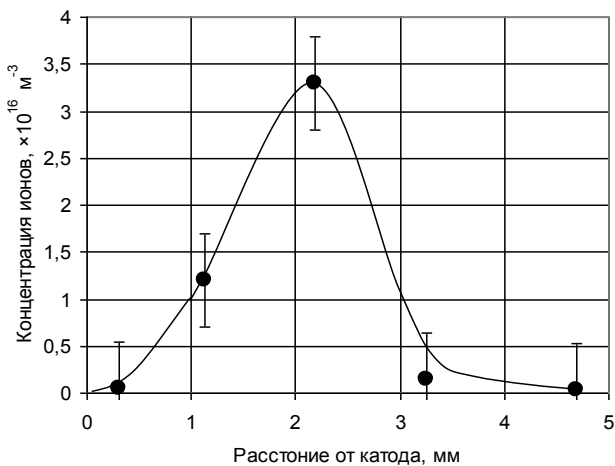


Рис. 5. Концентрация ионов у поверхности катода в разряде с ЭПК

Увеличение плотности ионов вблизи катода является следствием повышенной концентрации электронов в катодной полости, способных к участию в процессах ионизации. Распределение пространственного заряда в разряде с полым катодом позволяет удерживать электроны в катодной полости, что позволяет увеличить скорость ионизационных процессов, а также процесса вторичной эмиссии электронов.

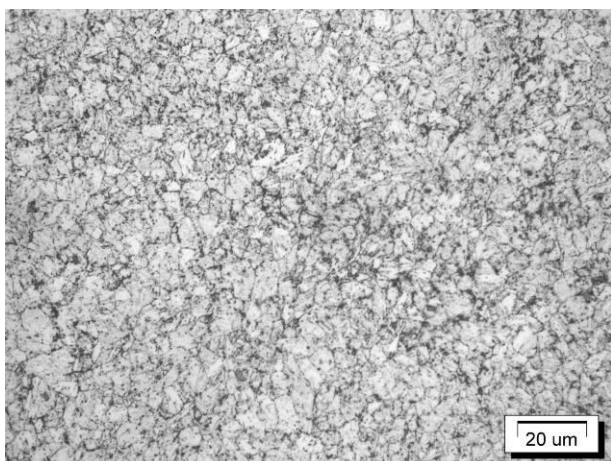


Рис. 6. Микроструктура стали 16ХЗНВФМБ-Ш после закалки с 930°C и высокого отпуска при 600°C

Ионному азотированию подвергались образцы из стали 16ХЗНВФМБ-Ш мартенситного класса, применяемой для изготовления высоко-

нагруженных зубчатых колес. Наличие нитридообразующих элементов позволяет применять эту сталь для повышения износостойкости деталей машин. На рис. 6 изображена исходная микроструктура стали после закалки 930° С и высокого отпуска при 600° С.

Анализ результатов измерения показал, что ионное азотирование ведет к увеличению микротвердости поверхности в 2–2,5 раза, что обусловлено формированием в приповерхностном слое нитридных фаз с высоким содержанием азота. Большое значение микротвердости получено из-за содержания в стали нитридообразующих элементов (*Cr, W, Ni, Mo, V*).

Результаты замеров микротвердости поверхности приведены в таблице.

Таблица
Результаты замеров микротвердости

Образцы	Режимы ионного азотирования			Исходная микротвердость HV ₅₀	Микротвердость поверхности HV ₅₀
	T, °C	t, ч	P, Па		
без ЭПК	550±10	6	350	400±20	550±20
с ЭПК			30		950±20

На рис. 7–8 показаны микроструктуры стали 16ХЗНВФМБ-Ш, подвергнутой ионному насыщению в тлеющем разряде с ЭПК и без него.

Анализ структуры образцов, прошедших азотирование в тлеющем разряде, показал наличие темной диффузионной зоны, размер которой меняется в зависимости от технологических параметров процесса обработки. Диффузионная зона представляет собой α-фазу – азотистый феррит с ОЦК решеткой, период которой меняется в зависимости от содержания азота [4]. Переход от азотированного слоя к основному материалу плавный, что является одним из основных требований к микроструктуре азотированной стали.

Использование ЭПК при ионном азотировании способствует увеличению толщины упрочненного слоя в 3–4 раза при одинаковой температуре процесса $T=550^{\circ}\text{C}$. При этом складываются благоприятные условия для сорбционных процессов, в результате которых обеспечивается высокая концентрация диффундирующего элемента на поверхности катода. Таким образом, интенсификация ионного азотирования при использовании ЭПК происходит вследствие ускорения диффузии активного азота в металле, главной движущей силой которой является градиент концентрации насыщающего элемента [5].

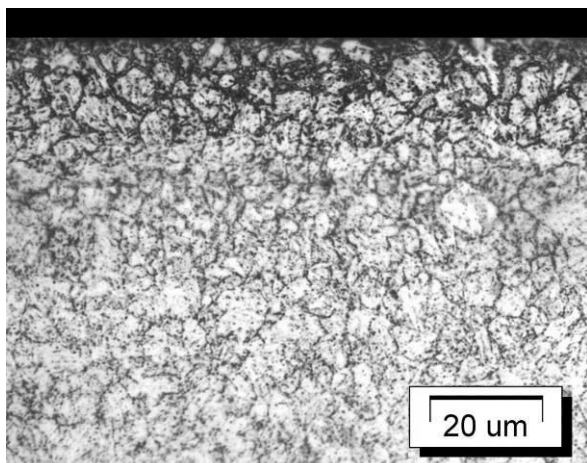


Рис. 7. Микроструктура стали 16Х3НВФМБ-Ш, азотирование в тлеющем разряде при $T = 550^\circ \text{C}$, $t = 6 \text{ ч}$, $P = 350 \text{ Па}$

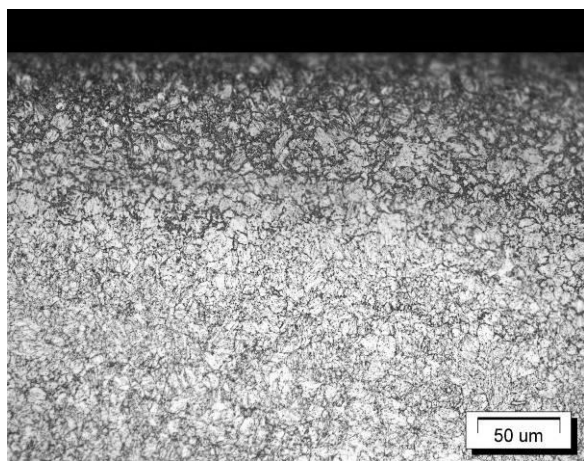


Рис. 8. Микроструктура стали 16Х3НВФМБ-Ш, азотирование в тлеющем разряде с ЭПК при $T = 550^\circ \text{C}$, $t = 6 \text{ ч}$, $P = 30 \text{ Па}$

ВЫВОДЫ

При ионном азотировании с ЭПК у поверхности обрабатываемой поверхности образуется повышенная концентрация ионов, что ведет к интенсификации процесса.

Ионное азотирование с ЭПК ведет к значительному увеличению микротвердости (в 2–2,5 раза, что обусловлено формированием в приповерхностном слое нитридных фаз легирующих элементов.

Использование ЭПК при ионном азотировании способствует увеличению толщины упрочненного слоя в 3–4 раза при одинаковой температуре процесса $T = 550^\circ \text{C}$.

Метод ионного азотирования с ЭПК является эффективным способом поверхностного упрочнения конструкционной стали 16Х3НВФМБ-Ш, а высокая скорость насыщения позволяет использовать данный эффект для локальной обработки материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зинченко В. М.** Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 303 с. [V. M. Zinchenko, *Surface engineering gears methods of chemical-thermal treatment*. Moscow: Publishing House of the MSTU N. E. Bauman, 2001.]
2. **Козловский И. С.** Химико-термическая обработка шестерен. М.: Машиностроение, 1970. 232 с. [I. S. Kozlovski, *Chemical heat treatment of gears*. Moscow: Mashinostroenie, 1970.]
3. **Герасимов С. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г.** Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 518 с. [S. A. Gerasimov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, *Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys*. Moscow: Publishing House of the MSTU N. E. Bauman, 2012.]
4. **Лактин Ю. М., Коган Я. Д.** Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с. [Yu. M. Lahtin, Ya. D. Kogan, *Nitriding steel*. Moscow: Mashinostroenie, 1976.]
5. **Пастух И. М.** Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. 364 с. [I. M. Pastuh, *Theory and practice of hydrogen-nitriding in a glow discharge*. Kharkov: KIPT, 2006.]
6. **Будилов В. В., Шехтман С. Р., Киреев Р. М.** Использование разряда с полым катодом для обработки поверхности конструкционных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 2. С. 31–35. [V. V. Budilov, S. R. Schechtman, R. M. Kireev, "Using discharge with hollow cathode for surface treating of design materials," *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov* (Physics and chemistry of materials processing), no. 2, pp. 31-35, 2001.]
7. **Будилов В. В., Агзамов Р. Д., Рамазанов К. Н.** Технология ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом // Митом. 2007. № 7. С. 25–29. [V. V. Budilov, R. D. Agzamov, K. N. Ramazanov, "Technology of ion nitriding in glow discharge with hollow cathode," *MITOM* (Metal science and heat treatment), vol. 49, no. 7, pp. 358-361, 2007.]
8. **Каган Ю. М., Перель В. И.** Зондовые методы исследования плазмы // Успехи физических наук. 1963. Т. 81. № 3. С. 411–450. [Y. M. Kagan, V. I. Perel, "Probe measurements in plasma," *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (Success of the physical sciences), vol. 81, no. 3, pp. 411-450, 1963.]

ОБ АВТОРАХ

БУДИЛОВ Владимир Васильевич, проф. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по tepl. двигателям ЛА (защ. в МАИ, 1995). Иссл. физ. процессов в низкотемпературной плазме, вакуумных ионно-плазменных технологий обработки.

РАМАЗАНОВ Камилль Нуруллаевич, доц. той же каф. Дипл. инж.-технолог (УГАТУ, 2004). Канд. техн. наук по вакуумным ионно-плазм. методам модифицирования поверхности. Иссл. высокотемпературное ионное азотирование конструкционных и инструментальных сталей в тлеющем разряде с полым катодом.

ХУСАИНОВ Юлдаш Гамирович, асп. той же каф. Дипл. инж. по машинам и технологиям высокоэффективн. процессов обработки (УГАТУ, 2012). Готовит дис. о локальных ионно-плазм. методах модифицирования поверхности.

ЗОЛОТОВ Илья Владимирович, асп. той же каф. Дипл. инж. по машинам и технологиям высокоэффективн. процессов обработки (УГАТУ, 2013). Готовит дис. о моделировании физ. процессов в плазме тлеющего разряда.

METADATA

Title: Prospects of effect hollow cathode in local nitriding steel parts 16H3NVFMB-SH.

Authors: V. V. Budilov, K. N. Ramazanov, Y. G. Khusainov, and I. V. Zolotov

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: vipt127@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 1 (62), pp. 32-36, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The influence of the hollow cathode effect (HCE) in the ion nitriding of steel 16H3NVFMB-SH was studied. Plasma probe measurements was performed and charged particles density distributions was obtained. The range of pressures and voltages at which HCE is manifested during ion nitriding on the modernized ELU-5 was investigated. Obtained and studied the microstructure of the surface layer, and the surface micro-hardness of 16H3NVFMB-SH steel samples, after ion nitriding with HCE and without it.

Key words: ion nitriding; glow discharge; local processing; plasma probe measurements.

About authors:

BUDILOV, Vladimir Vasilievich, Prof., Dept. of Engineering technology. Dipl. engineer (UAI, 1969). Dr. of Tech. Sci. (MAI, 1995).

RAMAZANOV, Kamil Nurullaevich, Dept. of Engineering technology. Dipl. Engineer-technologist (UGATU, 2004). Cand. of Tech. Sci. (Tomsk, 2009).

KHUSAINOV, Yuldash Gamirovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Engineering technology. Dipl. Engineer-technologist (UGATU, 2012).

ZOLOTOV, Ilya Vladimirovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Engineering technology. Dipl. Engineer technologist (UGATU, 2013).