

УДК 621.785.532

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛОКАЛЬНОГО ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ С ЭФФЕКТОМ ПОЛОГО КАТОДА НА ПРИМЕРЕ ДЕТАЛИ «ЗУБЧАТОЕ КОЛЕСО»

В. В. БУДИЛОВ¹, К. Н. РАМАЗАНОВ², Ю. Г. ХУСАИНОВ³, И. В. ЗОЛотов⁴

^{1,3}uldash990@mail.ru, ²kamram@rambler.ru, ⁴zolotov.ugatu@gmail.com

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 17 ноября 2014 г.

Аннотация. Предложена компьютерная модель, упрощающая подбор технологических режимов для операции локального ионного азотирования с ЭПК шестерней и зубчатых колес любой конфигурации и размеров. Исследовано влияние ЭПК при локальном ионном азотировании на распределение температурного поля и упрочненного слоя на примере детали «зубчатое колесо» из стали 38ХМЮА. Доказано, что применение ЭПК при локальном ионном азотировании позволяет повысить эффективность обработки деталей машиностроения вследствие увеличения скорости нагрева на упрочняемых участках.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; ионное азотирование; тлеющий разряд; локальная обработка; эффект полого катода.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1, 2], что большинство машиностроительных предприятий для упрочнения поверхности сталей и сплавов применяют процесс ионного азотирования в тлеющем разряде. В большинстве случаев поверхностному упрочнению подвергаются детали, работающие в условиях локального износа, поэтому зачастую нет необходимости упрочнять всю поверхность детали, а достаточно лишь обработать ее рабочую поверхность.

Использование ЭПК при ионном азотировании позволяет проводить локальную интенсификацию процесса диффузионного насыщения, что в конечном итоге сокращает время обработки [3, 4]. Одновременно с этим усложняется и сам процесс обработки. При локальном ионном азотировании с ЭПК скорость нагрева детали под технологическим экраном выше, чем на других участках. Вследствие этого возникает неравномерное распределение температуры в детали в течение всего процесса обработки. Известно [5, 6], что температура при азотировании имеет большое значение в активации процесса диффузии азота в металл и за формирова-

ние диффузионного слоя. Поэтому на сегодняшний день проведение моделирования тепловых и диффузионных процессов при локальном ионном азотировании является актуальной задачей. Получение более полного представления о процессах, протекающих в поверхностном слое материала во время обработки, даст возможность повышения эффективности азотирования за счет назначения оптимальных технологических режимов.

Представлены результаты моделирования процесса локального ионного азотирования с использованием ЭПК.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчет модели производился с помощью ЭВМ с использованием программы для расчета дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов.

Теоретическая модель объединяет в себе описание тепловых и диффузионных процессов.

Процесс диффузии описывается уравнением диффузии Фика [7]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \nabla(-D\nabla c) = 0, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; c – концентрация насыщающего элемента; τ – время диффузионного насыщения; x – координата.

Коэффициент диффузии D находится из уравнения Эйнштейна (Аррениуса) [7]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (2)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель; R – универсальная газовая постоянная; E_a – энергия активации; T – температура.

Для описания температурного поля в модели используется уравнение теплопроводности [8]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla(-k\nabla T) = Q, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала; C – удельная теплоемкость; τ – время; k – коэффициент теплопроводности; Q – удельный источник теплоты.

Начальные условия. В начальный момент времени концентрация насыщающего элемента в материале равна нулю, начальная температура материала равна комнатной:

$$c_0=0; T_0=293 \text{ К.}$$

Граничные условия. В компьютерной модели процесса локального ионного азотирования с ЭПК используются граничные условия третьего рода [8]:

$$(-D\nabla c)n = k_m(c_b - c), \quad (4)$$

где k_m – коэффициент переноса массы; n – нормальный вектор границы; c_b – объемная концентрация насыщающего элемента у поверхности материала [8];

$$-n(-k\nabla T) = q_0, \quad (5)$$

где h – коэффициент теплоотдачи; q_0 – тепловой поток через границу, который определяется как

$$q_0 = j_i U, \quad (6)$$

где j_i – плотность ионного тока; U – разность потенциалов между электродами.

Излучение потока теплоты в окружающую среду [8]:

$$-n(-k\nabla T) = \varepsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4), \quad (7)$$

где T_{amb} – температура окружающей среды; σ – постоянная Стефана–Больцмана; ε – коэффициент теплового излучения.

Для проведения расчетов на основе данной модели была выбрана деталь «зубчатое колесо»

(рис. 1), так как данный тип деталей подвергается локальному износу контактной поверхности зубьев и очень распространен в машиностроительном производстве.

При локальном ионном азотировании с ЭПК на участках поверхности детали, находящихся под экраном-сеткой, имеет место повышенная концентрация ионов, что приводит к увеличению плотности ионного тока, и, следовательно, к более интенсивному локальному нагреву. Однако отвод теплоты в окружающую среду за счет излучения остается неизменным по всей поверхности детали (рис. 2).

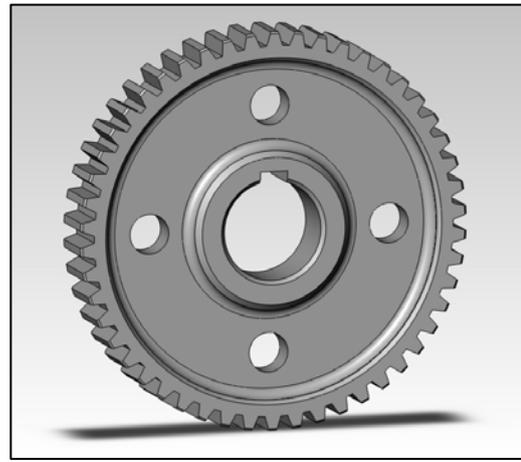


Рис. 1. Трехмерная модель детали «зубчатое колесо»

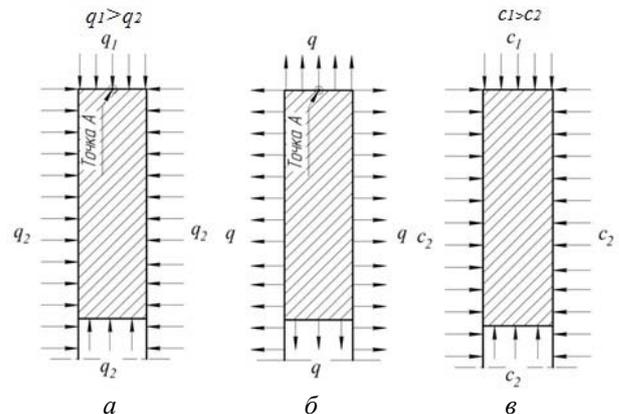


Рис. 2. Схемы подвода тепловой энергии от высокоэнергичных ионов на поверхность детали (а), отвода тепловой энергии излучением от поверхности в окружающее пространство (б) и распределения концентрации насыщающего элемента на поверхности детали (в)

Плотность тока в тлеющем разряде при ионном азотировании составляет 1–3 мА/см². Доказано, что плотность тока в тлеющем разряде при проявлении ЭПК больше в ~3 раза, чем

в традиционном тлеющем разряде, и может достигать 10 mA/cm^2 [3].

Для проверки адекватности модели была проведена серия экспериментов на модернизированной установке ЭЛУ-5 с нагревом обрабатываемого материала энергией плазмы тлеющего разряда. Исследование скорости нагрева и охлаждения проводили на зубчатых колесах из стали 38ХМЮА. Для обеспечения локальной интенсификации процесса венцы зубчатого колеса находились под технологическим экраном-сеткой для создания ЭПК.

Эксперименты по влиянию ионного азотирования с ЭПК на глубину упрочненного слоя проводились на термообработанных (закалка с 930°C и высокий отпуск при 600°C) образцах из стали 38ХМЮА. Расстояние от поверхности образца до технологического экрана составило $h = 5 \text{ мм}$ (рис. 3).

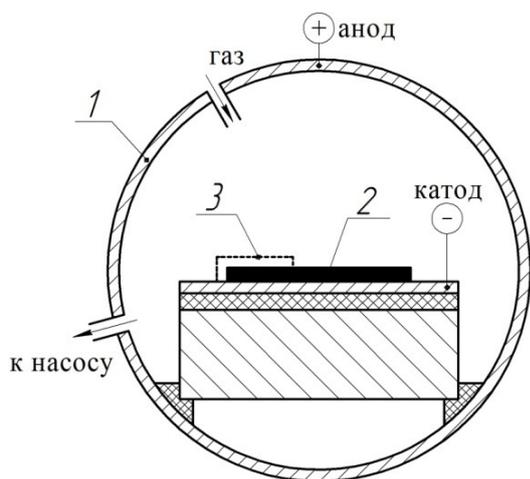


Рис. 3. Схема проведения эксперимента:
1 – вакуумная камера; 2 – образец;
3 – экран для создания ЭПК

Предварительная ионная очистка производилась в течение 15 мин при давлении $P = 10 \text{ Па}$ в среде аргона, температура поверхности не превышала $T = 250^\circ \text{C}$. Процесс диффузионного насыщения проходил в смеси азота, аргона и ацетилена ($\text{Ar } 70\%$, $\text{N}_2 \text{ } 25\%$, $\text{C}_2\text{H}_2 \text{ } 5\%$). Образцы азотировались в тлеющем разряде при температуре $T = 550 \pm 10^\circ \text{C}$. Обработка проводилась в течение $t = 8 \text{ ч}$.

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% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Замеры микротвердости поверхности выполнялись на микротвердомере Micromet-5101.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате расчетов компьютерной модели было получено распределение температурного поля в детали «зубчатое колесо» при локальном ионном азотировании с ЭПК. На рис. 4 показано распределение температуры поверхности детали после 8 ч локальной обработки. При этом температура поверхности зубьев составила $\sim 550^\circ \text{C}$.

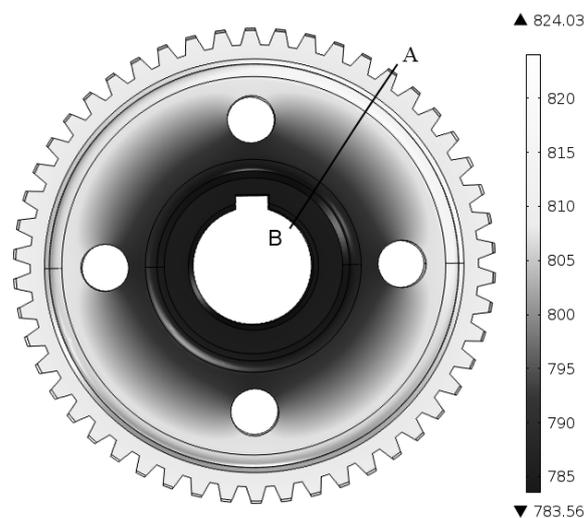


Рис. 4. Расчетное распределение температуры на поверхности детали «зубчатое колесо» при локальном ионном азотировании с ЭПК

Для зубчатого колеса диаметром 200 мм максимальная разность температуры между участками детали, азотированными с ЭПК и без, составляет $\sim 35^\circ \text{C}$ (рис. 4). Таким образом, на распределение температурного поля при локальном ионном азотировании с ЭПК влияют конфигурация и геометрические размеры обрабатываемой детали.

На рис. 5 приведены графики нагрева поверхности обрабатываемой детали в двух точках A и B, соответствующих максимальной и минимальной температуре поверхности (рис. 4), полученные путем моделирования и эксперимента.

Анализ полученных зависимостей показал, что после нагрева детали и выхода процесса на рабочий режим температура остается постоянной и равна $T = 550^\circ \text{C}$ до конца обработки. Это связано с установившимся равновесием между подводом тепловой энергии от ионов газа и ее отводом от поверхности в окружающее пространство. Время нагрева обрабатываемой поверхности до температуры насыщения составило около 40 мин (скорость нагрева при этом составила $0,2^\circ \text{C/c}$).

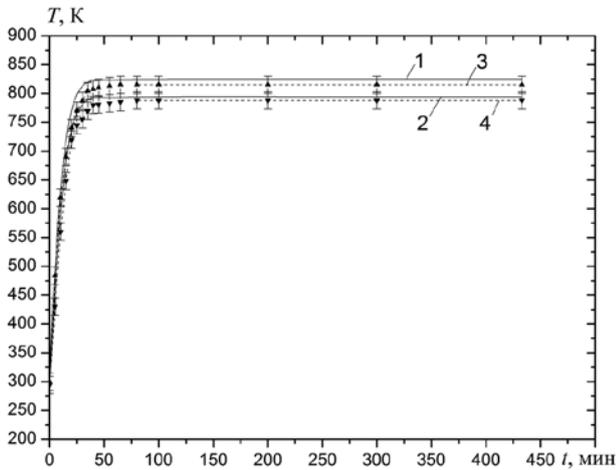


Рис. 5. График нагрева поверхности детали «зубчатое колесо» в точках *A* и *B* при локальном ионном азотировании с ЭПК:
 1 – теоретическая кривая, участок проявления ЭПК (точка *A*); 2 – теоретическая кривая, участок без проявления ЭПК (точка *B*);
 3 – экспериментальная кривая (точка *A*);
 4 – экспериментальная кривая (точка *B*)

На рис. 6 изображены рассчитанные и экспериментальные зависимости температуры точки *A* от времени при охлаждении детали по окончании процесса локального ионного азотирования с ЭПК.

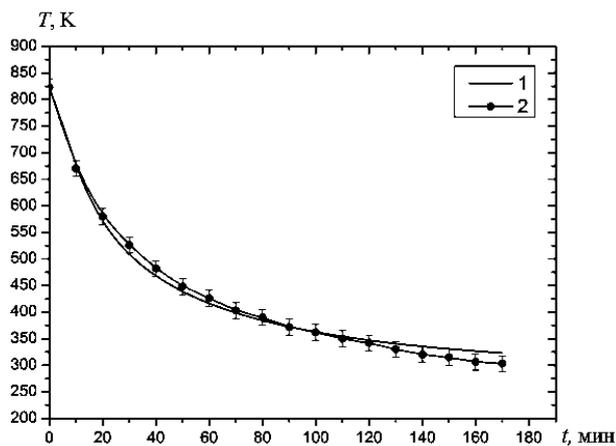


Рис. 6. График охлаждения обрабатываемой поверхности детали (точка *A*):
 1 – теоретическая кривая;
 2 – экспериментальная кривая

График охлаждения детали имеет практическое значение и позволяет выбрать время выдержки садки после завершения процесса локального ионного азотирования с ЭПК для деталей различных размеров и конфигураций. Из приведенных зависимостей видно, что обрабатываемая поверхность детали охлаждается до температуры 250°С (523 К) приблизительно за

30 мин.

Полученная в результате расчетов компьютерной модели кривая изменения концентрации насыщающего элемента по глубине диффузионного слоя для локально азотированного участка с ЭПК представлена на рис. 7.

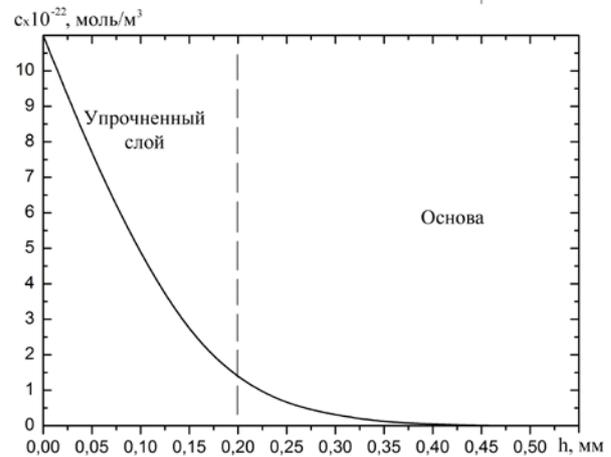


Рис. 7. Расчетное изменение концентрации насыщающего элемента (азота) по глубине диффузионного слоя (ст. 38ХМЮА, $T = 550^{\circ}\text{C}$, $t = 8\text{ ч}$)

Анализ полученной зависимости показывает, что глубина упрочненного слоя варьируется в диапазоне 180...220 мкм. Ионное азотирование с ЭПК образцов проводили при следующих режимах: $T = 550^{\circ}\text{C}$, $P = 60\text{ Па}$, $U = 500\text{ В}$, $t = 8\text{ ч}$.

На рис. 8 показана фотография микроструктуры стали 38ХМЮА после локального ионного азотирования с ЭПК.

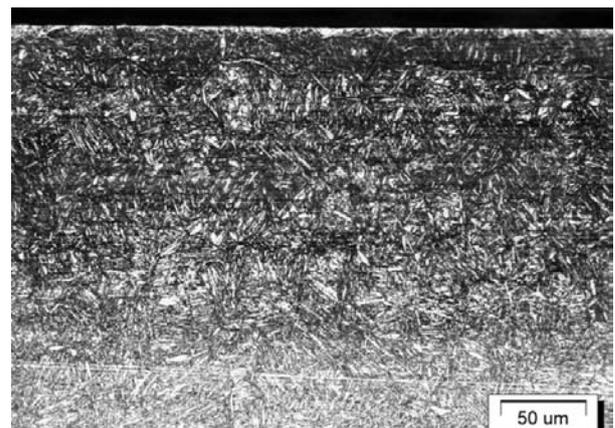


Рис. 8. Фотография микроструктуры стали 38ХМЮА после локального азотирования с ЭПК ($T = 550^{\circ}\text{C}$, $P = 60\text{ Па}$, $U = 500\text{ В}$, $t = 8\text{ ч}$)

Для определения глубины упрочненного слоя были произведены измерения микротвердости по глубине азотированного слоя на поперечном шлифе данного образца (рис. 9).

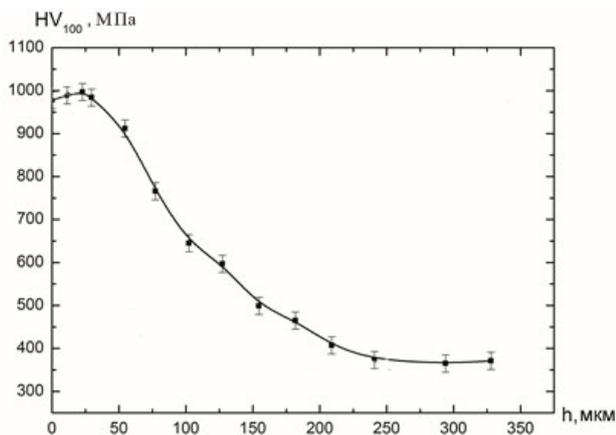


Рис. 9. Изменение микротвердости по глубине азотированного слоя образца из стали 38ХМЮА ($T = 550^\circ \text{C}$, $P = 60 \text{ Па}$, $U = 500 \text{ В}$, $T = 8 \text{ ч}$)

Измерения микротвердости на поперечном шлифе образца показали глубину упрочненного слоя в пределах до 220 мкм. Таким образом, экспериментальные данные имеют хорошую сходимость с результатами расчетов.

ВЫВОДЫ

Предложена компьютерная модель, позволяющая прогнозировать распределение температурного поля и определять концентрацию насыщающего элемента по глубине диффузионного слоя при локальном ионном азотировании с ЭПК для детали «Зубчатое колесо».

Установлено, что на поверхностное распределение температурного поля при локальном ионном азотировании с ЭПК влияет конфигурация и размер обрабатываемой детали.

Установлено, что азотируемая поверхность зубчатого колеса диаметром 200 мм нагревается до температуры диффузионного насыщения (550°C) примерно за ~ 40 мин, после чего температура поверхности остается неизменной до конца обработки. Это связано с установившимся равновесием между подводом тепловой энергии от высокоэнергичных ионов рабочего газа и отводом тепловой энергии излучением от поверхности детали в окружающее пространство. При этом максимальная разность температур между участками детали, азотированными с ЭПК и без, составляет $\sim 35^\circ \text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зинченко В. М.** Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: МГТУим. Н.Э. Баумана, 2001. 303с. [[V. M. Zinchenko, *Surface engineering gears methods of chemical-thermal treatment*, (in Russian). 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*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1970.]].

3. **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. Agzamor, K. N. Ramazanov, "Technology ion nitriding in glow discharge with a hollow cathode," (in Russian), in *Metal science and heat treatment*, vol. 49, no. 7, pp. 358-361, 2007.]].

4. **Будилов В. В., Рамазанов К. Н., Хусаинов Ю. Г.** Перспективы использования эффекта полого катода при локальном азотировании деталей из стали 16Х3НВФМБ-Ш // Вестник УГАТУ. 2014. Т.18. №1(62). С. 32–36. [[V. V. Budilov, K. N. Ramazanov, Yu. G. Khusainov, "Prospects of effect hollow cathode in local nitriding steel parts 16H3NVFMB-SH," (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 18, no.1(62), p.32-36, 2014.]].

5. **Герасимов С. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г.** Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. М.: МГТУим. 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*, (in Russian). Moscow: Publishing House of the MSTU N.E. Bauman, 2012.]].

6. **Лактин Ю. М., Коган Я. Д.** Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с. [[Yu. M. Lahtin, Ya. D. Kogan, *Steelnitriding*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1976.]].

7. **Коган Я. Д., Колачев Б. А., Левинский Ю. В.** и др. Константы взаимодействия металлов с газами: справочник. М.: Metallургия, 1987. 368 с. [[Ya. D. Kogan, B. A. Kolachev, Yu. V. Levinskiy. *Constant interaction of metals with gases*, (in Russian). М.: Metallургия, 1987.]].

8. **Исаченко В. П.** и др. Теплопередача: учебник для вузов. М.: Энергия, 1975. 488 с. [[V.P. Isachenko. *Heat transfer. Textbook for high schools*, (in Russian). Moscow: Energiya, 1975.]].

ОБ АВТОРАХ

БУДИЛОВ Владимир Васильевич, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (МАИ, 1995). Иссл. физ. процессов в низкотемпературной плазме, вакуумных ионно-плазм. технол. обр.

РАМАЗАНОВ Камиль Нуруллаевич, доц. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (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. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж. по машинам и технол. высокоэффективн. процессов обр. (УГАТУ, 2012). Готовит дис. о локальных ионно-плазм. методах модифицирования поверхности.

ЗОЛОТОВ Илья Владимирович, асп. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж. по машинам и технол. высокоэффективн. процессов обр. (УГАТУ, 2013). Готовит дис. о моделир. физ. процессов в плазме тлеющего разряда.

METADATA

Title: Computer modeling of local ion nitriding process with effect of hollow cathode using example of gear detail.

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

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

Email: uldash990@mail.ru, kamram@rambler.ru, zolotov.ugatu@gmail.com

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 2 (68), pp. 3-8, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: There was proposed a computer model that allows to forecast the distribution of temperature field and the depth of diffusion layer in the local ion nitriding with the effect of hollow cathode for the details of any shape and size. There was investigate the influence of effect of hollow cathode in the local ion nitroding on distribution of temperature field using example of details of gear detail. There was studied the influence of effect of hollow cathode in local ion nitriding to the depth of hardened layer for a sample of steel 38HMYUA.

Key words: computer model; ion nitriding; glow discharge; local processing; effect of hollow cathode.

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).