

УДК 621.793.18

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.62

## ПЛАЗМОВО-ІОННІ МЕТОДИ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ОБРОБЛЮВАНИХ ДЕТАЛЕЙ

Баранов О.О., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського,  
Горбенко С. С., Національний транспортний університет

*Анотація.* Робота присвячена вирішенню задачі підвищення експлуатаційних характеристик деталей типу «вал» автомобільної техніки за рахунок зміцнення поверхневих шарів в установках плазово-іонної обробки поверхні з використанням планарних магнетронних систем зі структурою порожнистого катода.

*Ключові слова:* вал, поверхневий шар, іони, плазма, зміцнення, імпульс, магнетрон, мікротвердість, напруга.

### Вступ

Через недосконалість та відсутність необхідного обладнання для проведення процесу якісної дефектації деталей значна їх частина замінюється новими, що призводить до зростання собівартості ремонту вузлів, агрегатів машин в порівнянні з собівартістю при їх виготовленні. Крім величини витрат на придбання нових деталей собівартість ремонту також залежить від оптимізації вибраного способу відновлення.

Для того щоб виріб ефективно виконував своє функціональне призначення, він повинен володіти необхідною для цього якістю.

Під якістю виробу розуміється сукупність його властивостей, що визначають відповідність функціональному призначенню і, отже, здатність задовольняти встановлені і передбачувані потреби. Якість виробів характеризується рядом показників (ГОСТ 15467-79), які можна розділити на наступні три групи:

1) технічні, що визначають ступінь досконалості виробу: потужність, ККД, продуктивність, економічність та ін.;

2) виробничо-технологічні (або технологічності конструкцій), що фіксують ефективність конструктивних рішень з точки зору мінімізації виробничих витрат, коштів на експлуатацію, технічне обслуговування та утилізацію: трудомісткість, матеріаломісткість, енергоємність, агрегатним, показники стандартизації та уніфікації;

3) експлуатаційні: надійність виробу; зручність і простота обслуговування; ергономічна характеристика або ступінь врахування комплексу гігієнічних, фізіологічних та інших потреб людини в системі людина - машина - середовище; естетична оцінка, тобто

досконалість художньої композиції, зовнішнє оформлення виробу та ін.

Відновлення деталей є основним джерелом ефективності авторемонтного виробництва. Більшість деталей має залишковий ресурс і може бути використано повторно в результаті проведення порівняно невеликого об'єму робіт по їх відновленню.

Витрати на відновлення деталей в умовах сучасних авторемонтних підприємств (АРП) складають залежно від конструктивно-технологічних особливостей деталей і характеру їх дефектів 10 – 50 % від вартості нових деталей.

Вдосконалення продукції утруднене без вживання нових прогресивних технологічних процесів, що дозволяють підвищити ресурс і надійність, забезпечити працездатність деталей і вузлів в найтяжчих умовах експлуатації, при високих температурах і в агресивних середовищах, дії динамічних і контактних навантажень. Цим викликано вживання процесів зміцнювальної технології в провідних галузях промисловості, що розширюється, і широкі дослідження, що проводяться в цій області в нашій країні і за кордоном.

### Аналіз публікацій

Магнетронне розпилення є одним з найбільш часто використовуваних методів осадження тонких плівок та обробки матеріалів. [1]. Останнім часом плазморозширювані системи магнетронного розпилення були успішно використані в різних передових сферах застосування, включаючи синтез та обробку мікроелементів та наночасток, а також біосумісних матеріалів.

Як розвиток існуючих плазово-іонних методів зміни експлуатаційних властивостей

поверхневих шарів оброблюваних деталей виник метод, також включає в себе значне число різновидів [4] – метод конденсації плазмових потоків з іонним бомбардуванням – КІБ, за кордоном найбільш часто використовується загальна назва *Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition - PIII & D* (плазмово-занурена імплантація і осадження) [5–7]. При реалізації цього методу деталь розміщується («занурюється») в плазму, яка генерується у вакуумній камері. У широкому сенсі, всі технології КІБ мають спільним те, що деталь (підкладка, мішень) знаходиться в плазмі, при цьому на деталь подається відносно високий негативний потенціал зміщення. Хоча відомо, що процеси плазмово-зануреної обробки ефективні для обробки різних матеріалів при подачі високого потенціалу зміщення на деталь, поряд з цим знайшли застосування процеси з подачею відносно невеликого потенціалу зміщення (азотування, цементация та карбонітрація).

#### Мета і постановка завдання

Метою роботи є дослідження відновлення поверхневого шару деталей типу «вал» автомобільних двигунів та інших агрегатів методом КІБ.

Для обробки поверхні найбільш важливими є процеси, які відбуваються в області поблизу поверхні, тобто в області катодного шару. Коли на деталь подається негативний потенціал зміщення, це призводить до бомбардування поверхні іонами, які витягуються з плазми і прискорюються в шарі. При цьому властивості електричного шару (область об'ємного заряду), який утворюється між оброблюваною підкладкою і плазмою, залежать від способу подачі напруги [2, 9].

Товщина шару є важливим технологічним параметром, оскільки вона визначає розмір геометричних нерівностей на поверхні деталей, які можуть бути рівномірно оброблені – для рівномірної обробки величина нерівностей повинна бути більше товщини шару. Очевидно, імпульсна подача високої напруги дозволяє обробити нерівності з характерними розмірами близько 50–100 мкм [3].

Шар, що оточує деталь, є джерелом енергії іонів. Іони, що вже знаходяться в шарі або тільки що входять до нього, прискорюються електричним полем шару, після чого вони проникають (імплантуються) в матеріал деталі. Таким чином, основною перевагою методу КІБ перед раніше розглянутими методами плазмово-іонної обробки є виключення

необхідності вилучення іонного променя, фокусування, транспортування, сканування і т.д., при цьому можливе досягнення високих значень адгезії і когезії при осадженні покриттів або формування необхідного профілю імплантації і легування при утворенні поверхневих шарів. Можливий також перехід на одному і тому ж обладнанні від імплантації і змінення властивостей поверхневих шарів до осадження покриття на поверхню оброблюваної деталі.

В основну технологічного пристрою покладений метод КІБ. [8, 9] Схема установки показана на рис. 1.

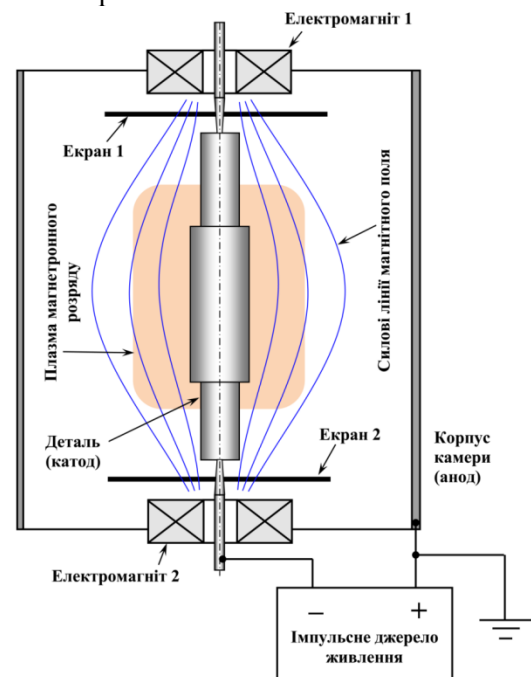


Рис. 1. Схема експериментального пристрою для іонної цементації валів

Магнетрона система, що включає оброблювану деталь, два екрани і два електромагніта, була встановлена в центрі циліндричної вакуумної камери (500×500 мм). Два однакових екрани та електромагніта змонтовані з обох боків оброблюваної деталі, як показано на рисунку. Електромагніт є соленоїдом у формі циліндра з зовнішнім діаметром 150 мм, внутрішнім діаметром 45 мм і висотою 106 мм (4100 витків), який був встановлений на феромагнітний диск діаметром 220 мм і висотою 20 мм, який, в свою чергу, служив для посилення магнітного потоку соленоїда. На котушку соленоїда встановлювався екран у формі диска, виготовленого з немагнітної нержавіючої сталі діаметром 300 мм і товщиною 8 мм. Таким чином, конструкція екранів, електромагнітів та дета-

лі мала структуру порожнистого катода. Така конструкція катода дозволяла замкнути силові лінії магнітного поля на поверхню, куди було подано від'ємний потенціал зміщення щодо заземлених стінок вакуумної камери. Це було необхідно для забезпечення ініціювання тліючого розряду шляхом створення конфігурації магнітної системи із замкнутим дрейфом електронів. Таким чином, розглянута система відноситься до планарних магнетронних систем зі структурою порожнистого катода [10].

Технологічний процес включав такі операції:

- іонне очищення в тліючому розряді в середовищі аргону, коли видаляються забруднені поверхневі шари;
- очищення і нагрів у магнетронному розряді в середовищі аргону;
- цементация в магнетронному розряді в середовищі метану, коли поверхневі насичуються вуглецем і здійснюється основний підігрів підкладки (додатковий підігрів при необхідності здійснюється резистивним нагрівачем).

Поверхня деталі розташовувалася на відстані  $R = 200$  мм від стінок вакуумної камери. Розрахунок товщини розпиленого шару поверхні деталі при очищенні в тліючому розряді проводився за допомогою рівнянь (4.2) і (4.4), в які підставлялися наступні параметри:  $I = 0,2$  А (визначалося з експерименту),  $\gamma_{sput} = 2$  (потенціал зміщення  $U_s = 1200$  В),  $m_a = 98 \times 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг;  $\rho_s = 15800$  кг/м<sup>3</sup>. Час обробки  $t_{sput} = 20$  хвилин признався відповідно до рекомендацій типового технологічного процесу, розрахункова товщина розпоршеного шару  $h_{sput}$  становила 0,2 мкм.

При розрахунку температурних режимів визначалося час обробки, виходячи з необхідності дотримання температури близько 500 °С при цементации. При іонному очищенні та нагріванні підтримувалася температура близько 600 °С.

Розрахунок проводився в два етапи: на першому розраховувався температурний режим оснащення, а на другому – деталі розміщеної на оснащенні. На другому етапі використовувалися результати розрахунку першого етапу, оскільки для визначення змінення температури деталі протягом певного проміжку часу  $\Delta t$  визначалася середня температура підкладки на цьому часовому інтервалі, а потім розраховувалося рівняння (4.11). Чисельний розрахунок температурних режимів оснащення проводився при наступ-

них параметрах:  $T_0 = 300$  К;  $d_s = 0,38$  м;  $h_s = 0,008$  м;  $d_t = 0,01$  м;  $l_t = 0,25$  м;  $k_s = 47$  Вт/(м·К) (сталь);  $\varepsilon = 0,25$ ;  $c_s = 462$  Дж/(кг·К) (сталь 18ХГТ);  $\rho_s = 7880$  кг/м<sup>3</sup> (сталь 18ХГТ). Значення іонного струму і потенціалу зміщення деталі підставлялися відповідно до технологічного етапу (див. вище). Чисельний розрахунок температурних режимів деталі, закріпленої в пристосуванні, проводився при наступних параметрах:  $T_0 = T_s(t)$  (середня температура підкладки на даному часовому інтервалі  $\Delta t$ ), К;  $A_p = 0,015 \times 0,015 = 2,25 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $m_p = 0,01$  кг;  $d_t = 0,003$  м;  $l_t = 0,018$  м;  $k_s = 47$  Вт/(м·К) (сталь 18ХГТ);  $\varepsilon = 0,25$ ;  $c_s = 462$  Дж/(кг·К) (сталь 18ХГТ);  $\rho_s = 7880$  кг/м<sup>3</sup> (сталь 18ХГТ). Значення густини іонного струму і потенціалу зміщення деталі підставлялися відповідно технологічної операції. Результати розрахунку температурного режиму оснащення і деталі, розміщеної в пристосуванні при плазмово-іонній обробці, наведені на рис. 2. Слід зазначити, що ці результати отримані при усередненні густини обробного іонного потоку уздовж поверхні підкладки. Температура цементации – близько 750 К (~480 °С).

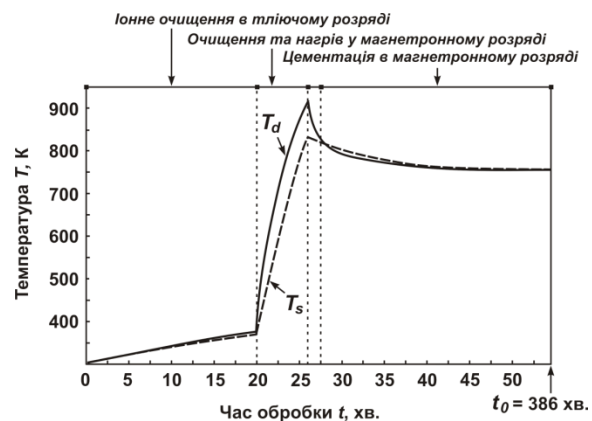


Рис. 2. Залежність температури від часу обробки:  $T_d$  – температура деталі;  $T_s$  – температура оснащення

Отже, плазмово-іонна цементация проводилася за наступним алгоритмом. Після того, як очищений зразок (механічна обробка, бензин та етиловий спирт) завантажений в робочу камеру та закріплений на тримачі, підключається система утворення вакууму в камері з використанням механічного форвакуумного та дифузійного насосів – до базового тиску  $1,5 \times 10^{-3}$  Па. Після дегазації зразку в камеру подається аргон – до тиску 2,6 Па. Після того, як тиск став стабільним, в атмос-

фері аргону генерується тліючий розряд шляхом імпульсної подачі на закріпленій вал від'ємного потенціалу зміщення 1,2 кВ з частотою повторення 100 Гц і довжиною 2 мс. Іони прискорювалися від'ємним потенціалом електричного шару біля поверхні деталі, що призводило до розпилювання матеріалу поверхні і, перед усім, забруднених шарів. Час іонного очищення в тліючому розряді – 20 хв.

Після цього застосовувалася перехідна фаза оброблення – очищення і нагрів у магнетронному розряді. Причиною цього є недостатнє очищення на попередній операції, внаслідок чого під час переходу на цементацию в магнетронному розряді можливо утворення уніполярних дуг на поверхню валу, що призводить до ушкодження цієї поверхні та збільшення її шорсткості. Струм електромагнітів відносно невеликий – 1 А, внаслідок чого магнітне поле також відносно невелике. У порівнянні з магнітним полем під час цементации. Водночас, тиск аргону знижується – до 1,1 Па, а густина іонного струму значно підвищується – з 1,6 А/м<sup>2</sup> до 50 А/м<sup>2</sup>.

Операція Параметри	Іонне очищення в тліючому розряді	Очищення і нагрів у магнетронному розряді	Цементация у магнетронному розряді
Час обробки $t$ , хв.	20	6	360
Тиск аргону $P$ , Па	2,6	1,1	
Тиск метану $P$ , Па			1,3
Міжелектродний потенціал $U_s$ , В	1200		500
Температура деталі $T_d$ , К	400	900	750
Густина іонного струму $j$ , А/м <sup>2</sup>	1,6	50	40
Струм електромагніту $I_m$ , А		1,0	2,2

Рис. 3. Параметри процесу формування цементованого шару на поверхні сталей 18ХГ і 18ХГТ

Наступна операція – іонна цементация в атмосфері метану. Іони метану генеруються в плазмі магнетронного розряду, для чого магнітне поле значно підсилюється – струм електромагнітів 2,2 А; тиск метану – 1,3 Па, міжелектродний потенціал знижується до 500 В; середня густина іонного струму також знижується до 40 А/м<sup>2</sup>. Іони вуглецю імпантуються в матеріал деталі, і, нарешті, дифундують в матеріал при температурі процесу протягом часу науглецювання близько 6 годин. Типові робочі параметри, що застосовуються під час процесу цементации, також перераховані на рис. 3.

### Висновки

Мікротвердість поверхневих шарів валу визначали за допомогою твердомірів Брінелля та Віккерса, структуру поверхні було досліджено за допомогою інструментального мікроскопу БМІ-1Ц з ціною ділення 5 мкм

Згідно з результатами вимірювання мікротвердості, для іонно-імплантованих шарів можливо досягнення твердості близько  $HV_{0,1} = 380$ , що означає, що твердість науглецьованої поверхні може бути збільшена у 1,8 разів.

Для більшості технологій зміцнення поверхневого шару, яким і є іонно-плазмова цементация, необхідною умовою є автоматизация технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару при можливості відтворення отриманих результатів у подальшому.

Однією з характеристик являється початкова вартість валу без зміцненого поверхневого шару. Формування зміцненого дифузійного шару на поверхні деталі завжди збільшує її вартість, для отримання економічної ефективності це повинно компенсуватися підвищенням експлуатаційних якостей деталі, тобто збільшенням ресурсу її роботи. Ресурс роботи деталі зі зміцненим поверхневим шаром являється експлуатаційною характеристикою, яка об'єднує можливості конкретного технологічного процесу створення зміцненої деталі.

Економічна ефективність валу зі зміцненим поверхневим шаром може бути отримана в процесі його експлуатації, а основний ефект саме і проявляється в результаті збільшення строку експлуатації.

### Література

1. Anders A. From plasma immersion ion implantation to deposition: a historical perspective on

- principles and trends / A. Anders // Surface and coatings technology. – 2002. – №156. – P. 3 – 12.
2. Lieberman M.A. Principles of plasma discharges for materials processing / M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg. // New York: Wiley Interscience, 1994. – 572 p.
  3. Ф.Ф. Комаров, А.П. Новиков, А.Ф. Буренков. Ионная имплантация /– Минск: Універсітэцкае, 1994. – 303 с.
  4. И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.Г. Брень. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой) // УФЖ. - 1979. - Т. 24, №4, - С. 515 – 525.
  5. Anders A. Fundamentals of pulsed plasmas for materials processing / A. Anders // Surface and coatings technology. - 2004. - V.183. - P. 301 - 311.
  6. Metel A. Plasma immersion ion implantation based on glow discharge with electrostatic confinement of electrons / A. Metel // Surface and coatings technology. - 2002. - V.156. - P. 38 – 43.
  7. Ide-Ektessabi A. Characteristics of an ion beam modification system with a linear ion source / A. Ide-Ektessabi, N.Y. Okuyama, D. Okuyama. // Review of scientific instruments. - 2002. - V.73, №2. - P. 873 – 876.
  8. Magnetic control of breakdown: Toward energy-efficient hollow-cathode magnetron discharges [Текст] / O. Baranov, M. Romanov, S. Kumar, X. Zhong, K. Ostrikov // Journal of applied physics. - 2011. – V. 109, № 6. – P. 063304-1–063304-8.
  9. Баранов, О. О. Теоретическая модель разряда магнетронного распылительного устройства // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 64. – X., 2014. – С. 102–119.
  10. Wang Z. Geometrical aspects of a hollow-cathode planar magnetron / Z. Wang, S.A. Cohen // Physics of plasmas. - 1999. – V.6. - P. 1655 – 1666.
  - Ukrainian Journal of Physics, Vol. 24, 4, 515 – 525.
  5. Anders A. Fundamentals of pulsed plasma for materials processing / A. Anders // Surface and coatings technology. 2004. V.183. P. 301 311.
  6. Metel A. Plasma immersion ion implantation based on glow discharge with electrostatic confinement of electrons / A. Metel // Surface and coatings technology. 2002 V.156. Pp. 38 - 43
  7. Ide-eqsaba A. Characteristics of an ion beam modification system with a linear ion source / A. Ide-Ektessabi, N.Y. Okuyama, D. Okuyama. // Review of scientific instruments. 2002. V.73, №2. Pp. 873 - 876.
  8. Magnetic control of breakdown: Toward energy-efficient hollow-cathode magnetron discharges [Text] / O. Baranov, M. Romanov, S. Kumar, X. Zhong, K. Ostrikov // Journal of Applied Physics. 2011. - Vol. 109, No. 6. - P. 063304-1-063304-8.
  9. Baranov, O. O.(2014). Teoreticheskaya model razryada magnetronnogo raspylitelnogo ustroystva [Theoretical model of discharge of magnetron spray device] // *Otkryitiye informatsionnyie i kompyuternyye integrirovannyye tehnologii: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «HAI» -Open information and computer integrated technologies: scientific journal of National aerospace university. N. E. Zhukovsky "KhAI"*, Vol. 64,102–119.
  10. Wang Z. Geometrical aspects of a hollow-cathode planar magnetron / Z. Wang, S.A. Cohen // Physics of Plasma. 1999. - V.6. P. 1655 - 1666.

#### Reference

1. Anders A. From plasma immersion ion implantation to deposition: a historical perspective on principles and trends / A. Anders // Surface and coatings technology. - 2002, No. 156. P. 3-12.
2. Lieberman M.A. Principles of plasma discharges for materials processing / M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg // New York: Wiley Interscience, 1994. - 572 p.
3. F.F. Komarov, A.P. Novikov, A.F. Burenkov.(1994). Ionnyaya implantatsiya [Ion implantation] / Minsk: Universitetskoe, 303.
4. I.I. Aksenov, A.A. Andreev, V.G. Bren.(1979). Pokryitiya, poluchennyie kondensatsiey plazmennyih potokov v vakuume (sposob kondensatsii s ionnoy bombardirovkoy) [Coatings obtained by condensation of plasma streams in a vacuum (ion bombardment condensation method)] // UFZh -

**Баранов Олег Олегович - доктор технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського, доцент кафедри машинобудівництва і роботомеханічних систем**  
тел.: (067) 605 – 50 – 55;  
e-mail: olbaranov@ukr.net

**Горбенко Сергій Сергійович – Національний транспортний університет, аспірант кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства,**  
тел.: (093) 816 – 84 – 54;  
e-mail: horbekoserhii@ukr.net

#### PLASMA-ION METHODS OF CHANGING OPERATIONAL PROPERTIES OF SURFACE LAYERS OF THE MACHINED PARTS

**Baranov O.O., National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Horbenko S.S., National Transport University**

**Abstract. Problem.** Improvement of production is difficult without the use of new progressive technological processes that can increase the resource and reliability, ensure the performance of parts and components in the most difficult operating conditions, at high temperatures and in aggressive environments, the effects of dynamic and contact loads. **Goal.** The purpose of the work is to study the restoration of the

surface layer of the "shaft" type parts of automobile engines and other aggregates by the Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition - PIII & D method. **Methodology.** The system under consideration refers to planar magnetron systems with the structure of a hollow cathode. The technological process involved the following operations: ion purification in a glow discharge in an argon medium when contaminated surface layers are removed; purification and heating in magnetron discharge in argon medium; cementation in a magnetron discharge in a medium of methane when the surface is saturated with carbon and the main heating of the substrate is carried out (additional heating is carried out, if necessary, by a resistive heater). **Results.** According to the results of the measurement of mica-hardness, for ion-implanted layers it is possible to achieve a hardness of about  $HV_{0.1} = 380$ , which means that the hardness of the coagulated surface can be increased by 1.8 times. **Originality.** The construction of the considered cathode allowed the magnetic field lines to come close to the surface where negative displacement potential was applied to the grounded walls of the vacuum chamber. This was necessary to ensure the initiation of a glow discharge by creating a configuration of a magnetic system with closed drift of electrons.

**Key words:** shaft, surface layer, ion, plasma, strengthening, pulse, magnetron, microhardness, voltage.

#### ПЛАЗМОВО-ИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Баранов О.О.,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е.Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»,  
Горбенко С.С.,  
Национальный транспортный университет

**Аннотация.** Работа посвящена решению задачи повышения эксплуатационных характеристик деталей типа «вал» автомобильной техники за счет упрочнения поверхностных слоев в установках плазменно-ионной обработки поверхности с использованием планарных магнетронных систем со структурой полого катода.

**Ключевые слова:** вал, поверхностный слой, ионы, плазма, укрепления, импульс, магнетрон, микротвердость, напряжение.