

УДК 621.785.5  
DOI: 10.12737/24959

**Б.М. Бржозовский, д.т.н.,  
Е.П. Зинина, д.т.н.,  
В.В. Мартынов, д.т.н.**  
(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)  
E-mail: v\_martynov@mail.ru

## **Технологические особенности формирования нанокompозитных структур на поверхностях сложного профиля воздействием низкотемпературной плазмы\***

*Представлены материалы по изучению технологических особенностей формирования нанокompозитных структур на поверхностях сложного профиля воздействием низкотемпературной плазмы с целью повышения износостойкости изделий из металлических материалов.*

**Ключевые слова:** сложнопрофильная поверхность; упрочнение; плазменные технологии; нанокompозитные структуры.

**B.M. Brzhozovsky, D. Eng.,  
E.P. Zinina, D. Eng.,  
V.V. Martynov, D. Eng.**  
(FSBEI of HE "Gagarin State Technical University of Saratov", 77, Polytechnicheskaya Str, 410054 Saratov)

## **Technological peculiarities in nano-composite structure formation on complex surfaces under influence of low-temperature plasma**

*The paper reports the consideration of plasma technologies for surface layer strengthening in products, in particular, the strengthening by the impact of low-temperature plasma of the combined discharge allowing the formation of nano-composite structures in a surface layer. By the example of a cutter made of steel R6M5 there are defined basic technological peculiarities of low-temperature plasma strengthening the account of which is possible at the expense of the optimization of parameter values defining the impact of plasma upon a surface. A chart of optimum parameters of a low-temperature plasma strengthening process is obtained. There are presented results of the study of a tool surface layer strengthened with the use of a chart and also tool operation at manufacturing parts made of different materials allowing the establishment of wear resistance increase.*

**Keywords:** complex surface; strengthening; plasma technologies; nano-composite structures.

Современный этап развития производства в различных отраслях характеризуется ужесточением условий эксплуатации изделий из металлических материалов и сплавов, связанных с действием повышенных температур, внешних силовых нагрузок, агрессивных сред. Это

требует непрерывного совершенствования существующих и развития новых технологий изготовления изделий, к числу которых относятся и технологии упрочнения их поверхностного слоя [1], в частности, плазменные: термоупрочнение, ионно-плазменное диффузионное внедрение, ионно-лучевая упрочняющая обработка. Рассмотрим эти технологии.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00030).

### Плазменное термоупрочнение [2, 3]

Значительного повышения износостойкости позволяет достичь плазменное поверхностное термоупрочнение. Сущность его технологии состоит в кратковременном поверхностном нагреве рабочей части изделия до температур, значительно превышающих точку аустенизации, с последующей закалкой.

Обработку проводят при атмосферном давлении с помощью электродугового плазматрона или в потоке индукционной плазмы. При этом в зоне термического влияния плазмы наблюдается изменение микротвердости, характерное для целого ряда способов термоупрочнения – лазерной обработки, закалки ТВЧ.

На поверхности формируется слой повышенной твердости, испытавший закалку от поверхностного источника тепла, далее располагается переходный слой, за ним лежит зона металлической матрицы, твердость которой определяется режимом объемной термообработки, проведенной перед поверхностным упрочнением.

Такая технология, обладая рядом преимуществ, вместе с тем имеет и определенные недостатки. Основные из них: ограничения на размеры обрабатываемых изделий, накладываемые зоной обработки; возможность обработки только открытых горизонтальных поверхностей.

Эффектом плазменного термоупрочнения металлических деталей обладает способ обработки импульсной плазмой. В основе этой технологии лежит принцип упрочнения за счет преобразования энергии возбуждаемых микроплазменных разрядов в тепло, в результате чего формируется оплавленный поверхностный слой исходного материала и происходит значительное уменьшение концентрации дефектов в нем.

### Технология ионно-плазменного диффузионного внедрения (ионного азотирования) [4, 5]

Ионное азотирование проводится в плазме несамостоятельного тлеющего разряда. Активный азот при ионном азотировании образуется в результате формирования тлеющего разряда в рабочей камере технологической печи. Газы, заполняющие ее рабочее пространство, под воздействием тлеющего разряда ионизируются.

Энергия образующихся при этом ионов

значительно превосходит энергию диссоциированного атома азота при обычном газовом азотировании. В процессе бомбардировки поверхности положительно заряженными азотосодержащими ионами изделие нагревается и происходит образование диффузионного слоя, содержащего нитриды.

Эффективность ионного азотирования обеспечивается только в случае получения азотированного слоя толщиной не более 0,3 мм. При упрочнении на большую глубину длительность цикла обработки поверхности становится сравнимой с длительностью цикла газового азотирования, и преимущества ионного азотирования теряются. Кроме этого, определяющим фактором ускорения насыщения становятся не процессы, связанные с активацией поверхности азотируемой детали, а процессы диффузии в металле, которые зависят, в основном, от температуры и длительности выдержки и протекают практически одинаково как при ионном, так и при газовом азотировании.

К числу достоинств ионного азотирования можно отнести: возможность управления процессом насыщения, обеспечивающим получение защитного покрытия высокого качества, заданного фазового состава и строения; обеспечение одинаковой активности газовой среды по всей обрабатываемой поверхности, охваченной тлеющим разрядом, что способствует образованию равномерного по толщине азотированного слоя; снижение трудоемкости местной защиты поверхности, не подлежащей азотированию; резкое сокращение длительности азотирования инструмента, расхода газа и электроэнергии по сравнению с термическим азотированием; снижение деформации изделия; отсутствие ε-фазы на обработанной поверхности.

Основной недостаток данного процесса – возможность несанкционированного перехода тлеющего разряда в дуговой.

### Ионно-лучевая упрочняющая обработка [6 - 9]

К основным технологиям ионно-лучевой упрочняющей обработки (ИЛО) относятся технологии, реализующие методы ионно-плазменного напыления, ионной имплантации, в том числе атомами отдачи, а также комбинированные методы.

Ионно-плазменное напыление применяется для упрочнения различных изделий путем осаждения на них тонкопленочных износостойких

покрытий в вакууме способом катодно-ионной бомбардировки (КИБ).

Сущность технологии заключается в распылении тугоплавкого материала катода, образовании ионов в низкотемпературной плазме и бомбардировке ими упрочняемой поверхности [7].

Напыляемый материал (материал катода) со скоростью  $10^6$  см/с испаряется в виде высокоскоростных струй, содержащих как заряженные, так и нейтральные частицы и представляющих собой плазменные потоки атомов и ионов с высокой степенью ионизации.

Изделие (анод) располагают на пути этих потоков и подают на нее ускоряющий поток ионов отрицательный потенциал. Выбитые с поверхности катода атомы разгоняются до высоких энергий и бомбардируют поверхность анода, очищая ее, внедряясь в кристаллическую решетку поверхностного слоя, накапливаясь там и образуя на поверхности покрытие из конденсируемого вещества.

Суть ионной имплантации заключается в обработке изделий ионами с энергией, которая достаточна для их внедрения в поверхностные слои материала. Пороговое значение энергии составляет 20 эВ, при этом глубина проникновения ионов не превышает нескольких межатомных расстояний. Наиболее перспективной считается имплантация ионов средних энергий, поскольку оборудование для высокоэнергетической имплантации остается сложным и дорогим. Низкоэнергетическая имплантация эффективна в сочетании с диффузионным отжигом.

Разновидностью ионной имплантации является имплантация атомами отдачи и ионное перемешивание. Эффективность технологии достигается при более низких энергиях, чем при прямой имплантации, основной недостаток заключается в распылении поверхности пленки при бомбардировке.

Разновидностью ИЛО является технология обработки с применением иммерсионной плазмы (ПИИИ) [8, 9]. Основная ее идея состоит в создании в вакуумной камере области газообразной плазмы, ионы из которой ускоряются и имплантируются в образец при прохождении через его держатель импульса высокого напряжения.

На электропроводящий держатель образцов подаются отрицательные высоковольтные импульсы напряжением до 100 кВ. Длительность и частота следования импульсов в различных плазменно-иммерсионных системах варьируется от нескольких микросекунд до 150 мкм

и от нескольких герц до 3 кГц соответственно.

В процессе прохождения высоковольтного импульса генерируется электрическое поле, которое ускоряет подвижные электроны в направлении от изделия. Они оставляют позади зону, которая содержит только ионы вместе с нейтральными атомами. В пределах зоны ионы ускоряются к образцу и имплантируются в него. Это позволяет внедрять ионы со всех сторон образца, за исключением места контакта образца с держателем. После прохождения высоковольтного импульса плазма регенерирует. Затем к образцу вновь прикладывается напряжение и процесс повторяется.

В настоящее время чаще всего генерацию плазмы производят посредством электромагнитных волн. Для этого используют радиочастотные методы или микроволновое возбуждение в режиме электрон-циклотронного резонанса. Последний метод является бесконтактным и позволяет создавать высокую концентрацию ионов.

Перспективность технологии ПИИИ заключается в возможности обработки сложнопрофильных поверхностей, однако время обработки варьируется в пределах 30...60 мин.

К числу плазменных технологий относится и воздействие на изделие низкотемпературной плазмой комбинированного разряда пониженного давления, позволяющее упрочнять поверхностный слой изделий за счет формирования в нем нанокompозитной структуры, способной устойчиво противодействовать внешним силовым возмущениям за счет внутренней перестройки в направлении действия внешних сил [10].

Практическая реализация процесса низкотемпературного плазменного упрочнения применительно к металлорежущему инструменту из стали Р6М5 позволила установить следующие закономерности поведения входных (давление в рабочей камере установки и подводимая в нее СВЧ-мощность: потенциал смещения, подаваемый на инструмент; время обработки,) и выходных (ток смещения в цепи «плазма – изделие – земля»; температура на не обрабатываемой части инструмента в момент отключения плазмы) параметров, обеспечивающих и сопровождающих процесс формирования нанокompозитной структуры на его рабочих поверхностях:

- для входных параметров:

- одинаковые сочетания параметров воздействия плазмы на поверхность для инструмента разного типоразмера дают результаты, которые могут существенно отличаться друг

от друга;

- индивидуальное фиксированное для каждого типоразмера местоположение обрабатываемой части инструмента в рабочей камере установки позволяет повысить воспроизводимость результатов упрочнения. При этом изменение уровня СВЧ-мощности осуществляется не за счет увеличения уровня подводимой СВЧ энергии, а в результате изменения напряженности СВЧ поля в разных точках пространства рабочей камеры вблизи инструмента;

- давление технологического газа должно соответствовать минимальному значению пробойного напряжения в рабочей камере установки;

**• для выходных параметров:**

- токи смещения при обработке инструмента всех рассматриваемых номиналов были минимальными и величина их составляла порядка 3...10 мкА, что указывает на проведение их обработки в идентичных условиях;

- на значение температуры на необрабатываемой части инструмента, через которую осуществляется отвод тепла из зоны плазменного нагрева (или лаговой температуры) для инструмента малых диаметров (0,7...1,5 мм) в большей степени оказывает влияние потенциал смещения, при этом местоположение в рабочей камере установки остается постоянным;

- увеличение лаговой температуры для инструмента  $\varnothing 2,0...8,0$  мм осуществляется за счет изменения линейной координаты вдоль оси рабочей камеры установки. При этом подводимая СВЧ-мощность практически не изменяется и равна ~28...32 Вт; потенциал смещения изменяется практически линейно;

- на изменение лаговой температуры инструмента больших диаметров оказывает влияние в большей степени расположение обрабатываемой части инструмента в зонах с более высокой напряженностью СВЧ-поля и уровень подводимой СВЧ-мощности;

- цвет поверхности обработанного инструмента изменяется от золотистого до темно-золотистого.

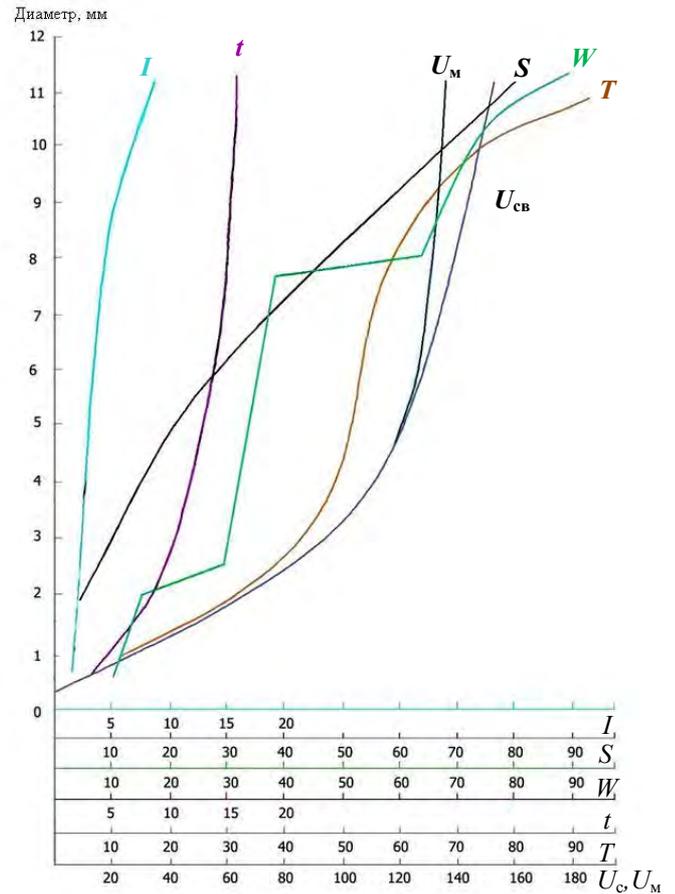
Кроме этого было установлено, что на формирование нанокompозитной структуры оказывают влияние масса, длина и физико-механические свойства материала инструмента, а также площадь обрабатываемой поверхности.

В совокупности полученные результаты позволили сделать следующие выводы.

1. Установленные закономерности определяют технологические особенности формиро-

вания нанокompозитных структур на поверхностях сложного профиля при низкотемпературном плазменном упрочнении.

2. Совокупный учет особенностей возможен за счет оптимизации значений параметров, определяющих воздействие низкотемпературной плазмы на поверхность.



**Рис. 1. Номограмма оптимальных параметров процесса низкотемпературного плазменного упрочнения:**

$W$  – подводимая СВЧ-мощность, Вт;

$U_{св}, U_m$  – потенциалы смещения, соответственно, для сверл и метчиков, В;

$t$  – время обработки, мин;

$S$  – площадь обрабатываемой поверхности, мм<sup>2</sup>;

$T$  – лаговая температура, °С;  $I$  – ток смещения, мкА

Полученные выводы были положены в основу разработки процедуры определения оптимальных значений параметров воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность сложного профиля по критерию воспроизводимости его результатов.

Представим пример этой разработки для формирования нанокompозитных структур на рабочих поверхностях инструмента (сверл и метчиков) из быстрорежущей стали Р6М5.



**Рис. 2. Внешний вид инструмента, прошедшего низкотемпературное плазменное упрочнение:**

*a – d* – сверла диаметром 10,5; 5,4; 3,0; 2,75; 1,0 мм соответственно; *e – u* – метчики М8; М6; М3; М1,5 соответственно

На первом этапе для диапазона диаметров инструмента 0,7...12 мм были сопоставлены значения входных и выходных параметров процесса упрочнения, координат положения инструмента в рабочей камере технологической установки, а также массы инструмента и площади обрабатываемой поверхности по критериям, обеспечивающим воспроизводимость результатов упрочнения: стабильности свечения плазмы (т.е. ее присутствия только вокруг обрабатываемой поверхности) и изменения окраски инструмента (от золотистой до темно-золотистой).

По результатам сопоставления в полях значений параметров были выделены области, максимально приближенные к выбранным критериям, и проведено усреднение значений параметров в них.

На втором этапе методом наименьших квадратов полученные массивы средних зна-

чений были аппроксимированы кривыми, характеризующими тенденции изменения параметров в зависимости от диаметра инструмента.

На третьем этапе совмещение графиков аппроксимирующих кривых позволило получить представленную на рис.1 номограмму оптимальных параметров процесса низкотемпературного плазменного упрочнения.

Практическое использование номограммы позволяет перейти от традиционного способа задания входных параметров процесса упрочнения для диапазонов значений какого-либо геометрического параметра инструмента к их заданию для любого значения этого параметра. Причем заданными становятся не только входные (подводимая СВЧ-мощность, потенциал смещения, положение в камере обработки), но и выходные (ток смещения, время достижения заданной температуры обработки) параметры, по которым можно, осуществляя

оперативный контроль за ходом процесса упрочнения, прогнозировать его качество.

Результаты практического использования номограммы (рис. 2) подтвердили ее работоспособность по результатам изучения поверхностного слоя упрочненного инструмента с помощью аналитического комплекса на базе растрового электронного микроскопа TESCAN MIRA\LMU.

Зафиксировано существенное уменьшение размеров и концентрации зерен карбидной фазы в поверхностном слое (в 1,8 и 1,74 раза, соответственно), возможное только в случае их растворения, а также изменение их формы с

округлой на эллипсовидную. На поверхности обнаружены цепочки мелких зерен с размером порядка 0,35...0,55 мкм.

Исследование поверхности вблизи режущей кромки на изготовленном шлифе позволило установить следующее (рис. 3).

1. Вблизи границы шлифа (на глубине до 1,5...2,0 мкм) размеры карбидных зерен имеют размеры менее 0,5 мкм (рис. 3, а). На глубине более 9,0 мкм размеры карбидных зерен изменяются слабо в сравнении с размерами карбидных зерен в сердцевине и имеют размеры порядка 1,0...1,5 мкм (рис. 3, а).

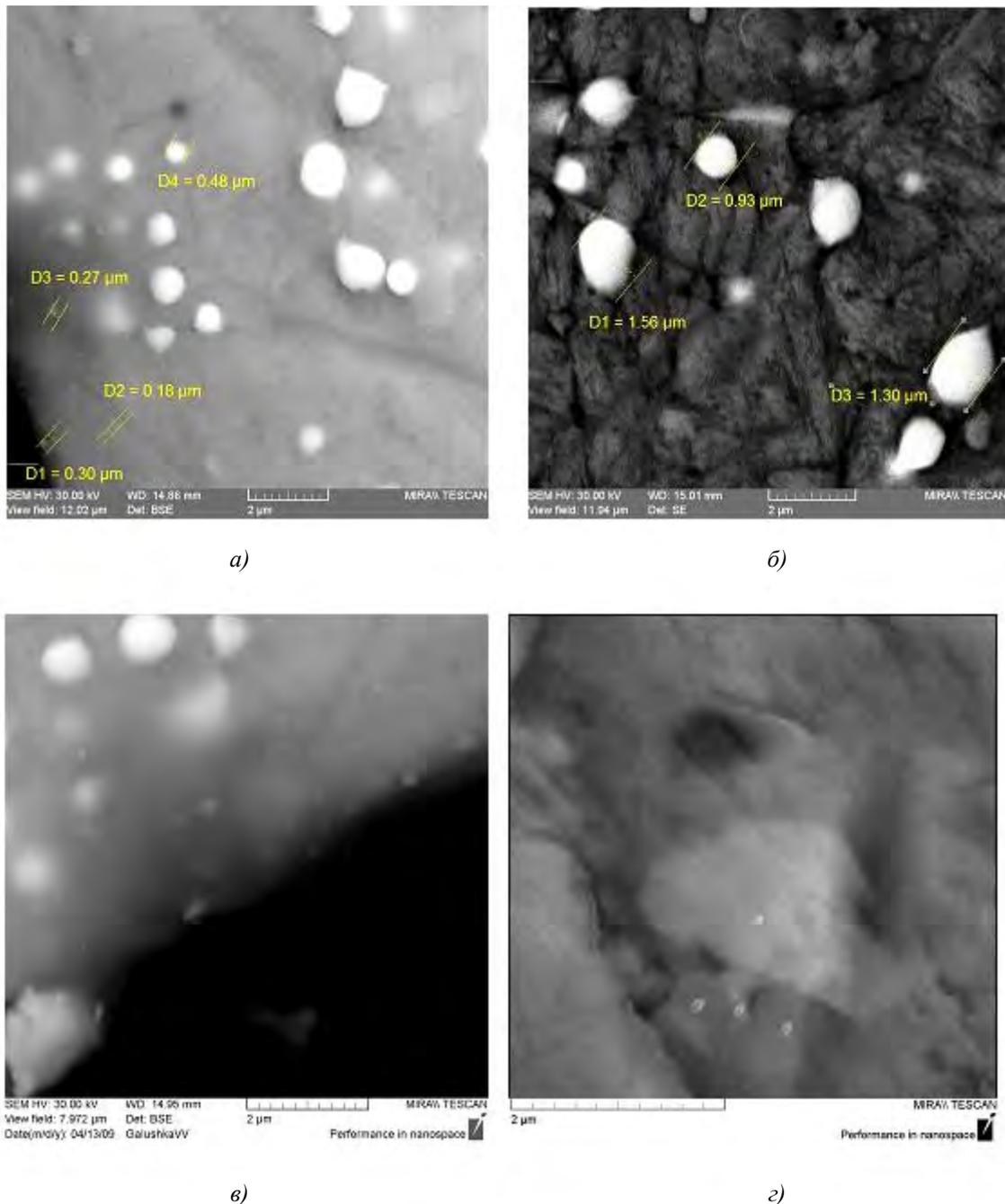


Рис. 3. Результаты воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность сложного профиля

Сердцевина инструмента имеет зернистую структуру с включениями в узлах и по границам зерен карбидной фазы с размерами карбидов в среднем 1,0...2,5 мкм (рис. 3, б).

2. В приповерхностных областях формируется слой толщиной порядка 2 мкм, в котором присутствуют зоны вокруг карбидных зерен, содержащие многочисленные плоские частицы неправильной формы толщиной порядка 100 нм и располагающиеся в виде сферы или облака (рис. 3, в). При этом за пределами данного слоя число наноразмерных частиц заметно сокращается.

Необходимо отметить также наличие менисков вокруг карбидных зерен в области их сопряжения с материалом. Это означает, что воздействие низкотемпературной плазмы приводит к расплавлению поверхностного слоя и растворению в нем карбидов. Более того, только разделением карбидных зерен на более мелкие можно объяснить появление на поверхности инструмента цепочек зерен с размерами 0,35...0,55 мкм.

3. Воздействие низкотемпературной плазмы приводит к оплавлению микронеровностей поверхности и «залечиванию» скрытых поверхностных дефектов по границам карбидных зерен (рис. 3, г), а также повышает в 3 раза концентрацию в поверхностном слое легирующих элементов (Mo, W, V), входящих в состав легированного феррита инструментальной стали.

Практическая апробация упрочненного инструмента проводилась в условиях реального производства на операциях сверления и нарезания резьбы в заготовках из различных материалов, и показала следующее:

– при сверлении отверстий в вязких материалах (медь, сталь 12Х18Н10Т) время стойкости инструмента повышается в 3–5 раз;

– при нарезании резьбы машинными метчиками МЗ в стали марки Ст.3 время стойкости повышается в 3,6 раза. Аналогичные результаты получены при испытаниях метчиков М5, М6, М8 (увеличение времени стойкости по стали Ст.3 в 3,6–4,01 раза);

– при нарезании резьбы в глухих отверстиях метчиками М10 время стойкости повышается в 4 раза.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Низкотемпературное плазменное упрочнение обеспечивает повышение эксплуатационной надежности изделий сложного профиля только на основе совокупного учета его

технологических особенностей.

2. Учет особенностей позволяет сформировать такое технологическое воздействие на поверхностный слой изделия, при котором энергия заряженных частиц низкотемпературной плазмы совершает работу по перестройке его структуры в направлении изменения фазового (образование наноразмерных структур) и химического (легирование элементами, входящими в карбидные зерна) составов, что приводит к изменению физико-механических свойств поверхностного слоя, обеспечивающего повышение износостойкости изделия.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Budinski K.G.** Surface Engineering for Wear Resistance. – Published by Prentice-Hall, 1988. – 420 p.

2. **Bochnowski W.** The influence of arc plasma electric and laser treatment on the structure and properties of the high speed steel // ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 17-20.

3. **Simulation of Heat Transfer in Reversed Polarity Current Plasma Surface Heat Treatment / Yuri Dmitrievich Shitsyn, Dmitry Sergeevich Belinin, Sergey Dmitrievich Neulybin, Dmitry Nikolaevich Trushnikov // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), 2015, vol. 2, no. 5, pp. 1166-1168.**

4. **Combined vacuum plasma surface treatment for increase of durability of face milling cutters from high-speed steel: Kombinierte Oberflächenbehandlung durch Vakuum-Plasmatechnik zur Erhöhung der Lebensdauer von Planfräsern aus Schnellerbeitstah / S. Grigoriev, M. Volosova, Y. Melnik, N. Cherkasova // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2015, vol. 46, no. 1. pp.10-15.**

5. **Grigoriev S.N., Metel A.S., Fedorov S.V.** Modification of the structure and properties of high-speed steel by combined vacuum-plasma treatment // Metal Science and Heat Treatment, 2012, vol. 54, no. 1–2, pp. 8–12.

6. **Dearnaley G.** Ion Implantation and Ion Assisted Coatings for Wear Resistance in Metals // Surf. Eng., 1986, vol.2, pp. 213–221.

7. **Grigoriev S.N., Melnik Yu.A., Metel A.S.** Gas discharge source of metal vapor and fast gas atoms // Instruments and Experimental Techniques, 2013, vol. 56, no 3, pp. 358–364.

8. **Grigoriev S.N., Metel A.S., Volosova M.A., Melnik Y.A.** Surface hardening by means of plasma immersion ion implantation and nitriding in glow discharge with electrostatic confinement of electrons // Mechanics and Industry, 2015, vol. 16, no. 7, 6 p.

9. **Previous heat treatment inducing different plasma nitriding behaviors in martensitic stainless steels / C.A. Figueroa, F. Alvarez, D.R.G. Mitchell, G.A. Collins, K.T. Short // Journal of Vacuum Science and Technology Part A: International**

Journal Devoted to Vacuum, Surfaces, and Films, 2006, 24 (5), pp. 1795–1801.

10. Бржозовский, Б.М., Мартынов, В.В., Зинина, Е.П., Плешакова, Е.С. Анализ возможностей формирования диссипативных структур в поверхностном слое рабочей части металлорежущего инструмента // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 9(51). – С. 28–37.

## REFERENCES

1. Budinski K.G. Surface Engineering for Wear Resistance. – Published by Prentice-Hall, 1988. – 420 p.
2. Bochnowski W. The influence of arc plasma electric and laser treatment on the structure and properties of the high speed steel // *Archives of Foundry Engineering*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 17-20.
3. Simulation of Heat Transfer in Reversed Polarity Current Plasma Surface Heat Treatment / Yuri Dmitrievich Shitsyn, Dmitry Sergeevich Belinin, Sergey Dmitrievich Neulybin, Dmitry Nikolaevich Trushnikov // *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 2015, vol. 2, no. 5, pp. 1166-1168.
4. Combined vacuum plasma surface treatment for increase of durability of face milling cutters from high-speed steel: Kombinierte Oberflächenbehandlung durch Vakuum-Plasmatechnik zur Erhöhung der Lebensdauer von Planfräsern aus Schnellerbeitstah / S. Grigoriev, M. Volosova, Y. Melnik, N. Cherkasova // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2015, vol. 46, no. 1. pp.10-15.

5. Grigoriev S.N., Metel A.S., Fedorov S.V. Modification of the structure and properties of high-speed steel by combined vacuum-plasma treatment // *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, no. 1–2, pp. 8–12.

6. Dearnaley G. Ion Implantation and Ion Assisted Coatings for Wear Resistance in Metals // *Surf. Eng.*, 1986, vol.2, pp. 213–221.

7. Grigoriev S.N., Melnik Yu.A., Metel A.S. Gas discharge source of metal vapor and fast gas atoms // *Instruments and Experimental Techniques*, 2013, vol. 56, no 3, pp. 358–364.

8. Grigoriev S.N., Metel A.S., Volosova M.A., Melnik Y.A. Surface hardening by means of plasma immersion ion implantation and nitriding in glow discharge with electrostatic confinement of electrons // *Mechanics and Industry*, 2015, vol. 16, no. 7, 6 p.

9. Previous heat treatment inducing different plasma nitriding behaviors in martensitic stainless steels / C.A. Figueroa, F. Alvarez, D.R.G. Mitchell, G.A. Collins, K.T. Short // *Journal of Vacuum Science and Technology Part A: International Journal Devoted to Vacuum, Surfaces, and Films*, 2006, 24 (5), pp. 1795–1801.

10. Brzhozovsky, B.M., Martynov, V.V., Zinina, E.P., Ple-shakova, E.S. Analysis of possibilities in dissipative structure formation in surface layer of cutter working part // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 9(51). – pp. 28–37.

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев

УДК 621.785  
DOI: 10.12737/24960

А.Е. Балановский, д.т.н.,  
Ву Ван Гюи, аспирант  
(Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83)  
E-mail: huy241989@gmail.com

## Технологическое повышение качества поверхности деталей с плазменной цементацией

Рассмотрена новая технология насыщения поверхности металла углеродом из паст, обмазок с использованием плазменной дуги. Представлена последовательность изготовления коллоидного графитового раствора для процесса плазменной поверхностной цементации. Изучено изменение поверхности после плазменной цементации с использованием нового поколения графитового состава.

**Ключевые слова:** плазменная цементация; паста; цементация; диффузия; микротвердость; микрорельеф; шероховатость.