

**НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБЛУЧЕНИЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ****Юров Виктор Михайлович***кандидат физ.-мат. наук, доцент***Гученко Сергей Алексеевич***докторант PhD***Маханов Канат Мэтович***кандидат физ.-мат. наук, доцент**Карагандинский государственный университет имени Е.А. Букетова,**Казахстан, Караганда***LOW ENERGY GEAR EXPOSURE****Yurov Viktor***Candidate of phys.-mat. sciences, associate professor***Guchenko Sergey***PhD student***Makhanov Kanat Matovich***Candidate of phys.-mat. sciences, associate professor**Karaganda State University named after EA. Buketova,**Kazakhstan, Karaganda***АННОТАЦИЯ**

В настоящей работе на зубчатые передачи наносились традиционные нитрид титановые покрытия, но с использованием низкоэнергетического облучения. На основе приведенных примеров использования ионного и ионно-плазменного ассистирования в процессе или после осаждения покрытий можно сделать вывод, что дополнительная бомбардировка газовыми или металлическими ионами позволяет кардинально изменять структуру конденсата.

**ABSTRACT**

In this work, conventional titanium nitride coatings were applied to gears, but using low-energy radiation. Based on the above examples of the use of ion and ion-plasma assistance during or after the deposition of coatings, it can be concluded that additional bombardment with gas or metal ions makes it possible to radically change the structure of the condensate.

**Ключевые слова:** покрытие, поверхность, напыление, ионно-плазменное ассистирование

**Key words:** coating, surface, spraying, ion-plasma assistance

Зубчатые передачи широко применяются в машиностроении. Большой срок их эксплуатации зачастую определяют в целом ресурс работы машин. Но выход из строя при эксплуатации зубчатых колес связан, в большинстве случаев, с поломкой зубьев колес и разрушением поверхности из-за цикличности действия контактных напряжений [1, 2]. В работе [2] проводились испытания сталей Ст. 3, 40Х, 65Г и 12Х18Н10Т, используемых при изготовлении зубчатых передач, методом ионного азотирования в водородной среде состава 75 об. % N<sub>2</sub> + 25 об. % H<sub>2</sub> и безводородной среде состава 75 об. % N<sub>2</sub> + 25 об. % Ar<sub>2</sub>. При этом температура азотирования была T = 580 °С, давление P = 240 Па и время азотирования t = 4 часа. Контактная выносливость образцов после ионного азотирования в безводородной среде в 1,4-1,5 раз больше по сравнению с не азотированными образцами и на 14-25% выше по сравнению с азотированием в водородной среде [2].

Целью настоящей работы является упрочнение зубчатой передачи путем ионно-плазменного азотирования с одновременным нитрид титановым покрытием.

В качестве образца для эксперимента использовалась звездочка: внешний диаметр 250 мм; внутренний диаметр 50 мм; толщина 25 мм;

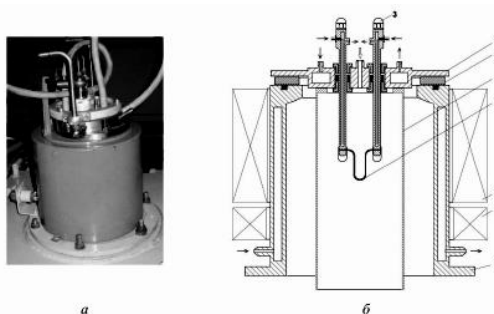
шаг 50. Образец вырезался с помощью плазмореза. Нами использовался микротвердомер HVS-1000А. Данный прибор разработан с использованием последних достижений в механике, оптике, электронике и компьютерных технологиях для проведения испытаний на твердость металлических и неметаллических материалов, особо мелких деталей или тонких закаленных слоев. В результате прибор способен обеспечивать стабильными и достоверными высокоточными результатами. Он так же может использоваться для исследования структуры металлических материалов и для определения распределения цементита по поверхности и экспериментов с определением твердости по методу Кнупа [3].

Нанесение нитрид титановых покрытий на «звездочки» проводилось нами на базе установки ННВ-6.6И1.

В качестве источника газовой плазмы применялся плазменный источник «ПИНК» с комбинированным накаливаемым и полым катодом [14], разработанный в лаборатории плазменной эмиссионной электроники (ЛПЭЭ) ИСЭ СО РАН (рис. 1). Генератор плазмы «ПИНК» расположен на верхнем фланце камеры ННВ-6.6И1. Источник газовой плазмы «ПИНК» представляет собой плазменный источник на основе

несамостоятельного дугового разряда с комбинированным накаливаемым и полым катодом. На фланце 6 смонтированы два водоохлаждаемых электроввода 3 для питания прямонакального катода 2. Цилиндрический экранный электрод 1 диаметром 90 мм и длиной 350 мм закреплен на вакуумной стороне фланца 6. Катод выполнен из вольфрамовой проволоки длиной 125 мм и толщиной 1,5 мм. Питание накала обеспечивается трансформатором с регулировкой переменного (50 Гц) напряжения по его первичной обмотке. Электрическое питание разряда осуществляется от источника напряжения, включающего в себя трехфазные трансформатор и выпрямитель. Плазменный источник изолирован от корпуса установки и находится под плавающим потенциалом. Газ в источник газовой плазмы

подается через газоввод на фланце 6 от системы напуска газа, включающей два регулятора расхода газа РРГ-10. Источник газовой плазмы «ПИНК» [4, 5] работает по следующему принципу. После подачи газа, стабилизации давления в камере и создании в рабочем объеме плазмогенератора продольного магнитного поля с магнитной индукцией  $B = 0,1-3$  мТл включается накал катода и подается напряжение на электроды разрядной системы. Электроны, эмитируемые термокатодом, ускоряются в направлении к дополнительному электроду, который в момент зажигания разряда выполняет роль вспомогательного анода, и ионизируют газ в катодной полости, тем самым провоцируя зажигание разряда в промежутке накаленного катода-поджигающего электрод.



1 – катодная полость; 2 – накаленный вольфрамовый катод; 3 – электроввод; 4 – стабилизирующая катушка; 5 – фокусирующая катушка; 6 – водоохлаждаемый фланец; 7 – изолятор; 8 – водоохлаждаемый корпус.

Рисунок 1– Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) плазменного источника «ПИНК» [4].

При этом полый катод заполняется плазмой, которая распространяется в вакуумную камеру. Это приводит к переключению горения разряда на основной анод (внутренние стенки вакуумной камеры), т.е. происходит зажигание основного несамостоятельного дугового разряда. Под действием внешнего магнитного поля траектория электронов, эмитируемых с накаленного катода, искривляется. Движение электронов происходит по цилиндрической спирали, что увеличивает их путь к аноду, тем самым приводя к увеличению эффективности ионизации газа.

Изменяя ток накала, следовательно, и эмиссию электронов с термо катода, можно легко регулировать ток разряда от десятков до сотен ампер при напряжении горения в несколько десятков вольт. Такой разряд классифицируется как несамостоятельный дуговой разряд с накаленным катодом без катодного пятна. Данный дуговой разряд позволяет эффективно генерировать низкотемпературную плазму в больших объемах ( $\geq 0,1$  м<sup>3</sup>) с концентрацией  $n_e \sim 10^9-10^{11}$  см<sup>-3</sup> и однородностью не хуже  $\pm 15$  %. В результате звездочки имеют вид нитрид титановых покрытий (рис. 2).



а)



б)

Рисунок 1 – «Звездочка» без азотирования (а) и с азотированием и нитрид титановым покрытием (б)

Микротвердость  $\mu$  образца «звездочки» без покрытия и с покрытием с ассистированием ПИНК в течение 1 часа при нагрузке HV 0,05=0,49N (табл. 1).

Таблица 1

| Микротвердость «звездочки» без покрытия и с покрытием |     |     |     |     |     |     |     |     |         |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| Образец   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | Среднее |
| $\mu$ , HV б/п  | 218 | 220 | 232 | 228 | 214 | 226 | 224 | 223 | 224     |
| $\mu$ , HV с/п  | 382 | 370 | 374 | 375 | 369 | 376 | 377 | 375 | 375     |

Из табл. 1 следует, что ассистирование ПИНК приводит к увеличению микротвердости более чем в 1,7 раза по сравнению исходным. Ассистирование

ПИНК показывает, что структуру покрытия можно изменить, используя ионную бомбардировку азотом.



а)



б)

Рисунок 2 – Микротвердость без покрытия (а) и с покрытием (б)

На рис. 2 показано изображение покрытия TiN после облучения азотом.

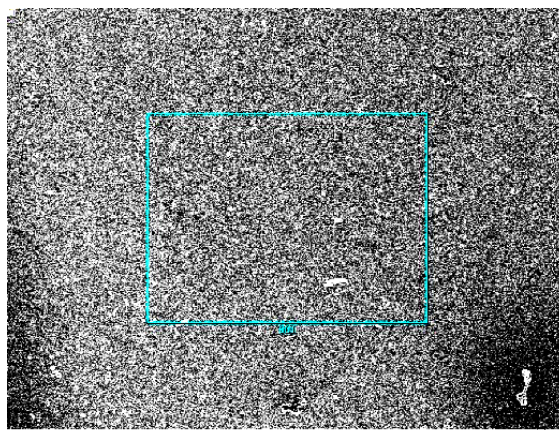


Рисунок 2 - Электронно-микроскопическое изображение покрытия TiN после ионной бомбардировки образца Ст. 3.

Одним из перспективных методов ассистирования процесса синтеза покрытий является низкоэнергетическое ионное облучение [6-8], в ходе которого не происходит существенного изменения системы покрытие/подложка, но появляется возможность регулирования структурно-фазового и элементного состава покрытий и их свойств.

В [8] показано, что одновременное с напылением титана облучение ионами азота, во-первых, исключает формирование высокоэнергетических нано- и субмикроструктурных субструктур с высокой кривизной кристаллической решетки и высокой плотностью частичных дисклинаций в границах зерен и связанных с этим высоких локальных напряжений, и во-вторых, оно стимулирует эпитаксиальный механизм формирования нитридной фазы на подложке  $\gamma$ -аустенита, и в-третьих, приводит к повышению пластичности нитридного покрытия (от 3 до 6 %).

Плазменное ассистирование можно использовать при вакуумно-дуговом осаждении покрытий, которое является одним из этапов комплексной обработки сталей [9-11], включающей предварительное ионное азотирование поверхности и последующее нанесение TiN покрытия в едином технологическом цикле. Такая комбинированная обработка стали Ст. 3 позволяет формировать в поверхностном слое нитрид ( $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N) и обеспечивает градиентное снижение твердости по глубине образца. Это обеспечивает повышение адгезии TiN покрытия к стальной подложке и существенное увеличение износостойкости полученной композиции.

В [11, 12] показаны эксперименты по осаждению TiN покрытий вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом при токе газового плазмодугового генератора 10–12 А и токе дугового испарителя 50–100 А, в которых изучалось влияние отрицательного напряжения смещения на формирование ионно-плазменных покрытий, а его значение составляло 15, 200, 600 и 1000 В. Установлено, что при плазменно-ассистированном нанесении покрытия напряжение смещения, прикладываемое к образцу, имеет определяющее значение в изменении структуры и фазового состояния в процессе формирования слоя. Исследования показали, что при малых отрицательных значениях напряжения смещения формируется пластинчатая структура с высоким уровнем упругих полей напряжения. Увеличение смещения приводит к формированию в пластинах наноразмерной поликристаллической структуры в результате разбиения на отдельные разориентированные кристаллиты. Оптимальным напряжением смещения оказывается  $U_{см} = -200$  В. Предполагается, что модификация структуры и свойств TiN, осажденных в условиях вакуумно-дугового распыления титана при облучении низкоэнергетическими ионами азота, обусловлена развитием релаксационных процессов вследствие ионного миксинга, генерации точечных дефектов и

повышения диффузионной подвижности адатомов на поверхности растущего покрытия [12].

#### **Заключение.**

На основе приведенных примеров использования ионного и ионно-плазменного ассистирования в процессе или после осаждения покрытий можно сделать вывод, что дополнительная бомбардировка газовыми или металлическими ионами позволяет кардинально изменять структуру конденсата. При ионном стимулировании роста покрытий возможно повысить содержание атомарной и ионной компонент в газовом потоке за счет уменьшения молекулярной составляющей. Энергия, привносимая ионным пучком, может приводить к повышению коэффициента диффузии, что дает возможность наносить покрытия при невысоких температурах, тем самым уменьшая размер зерен.

**Работа выполнена по программе МОН РК. Гранты №0118РК000063 и №Ф.0781.**

#### **Литература**

1. Коф И.А., Корнилов В.В., Ефимов Е.В. Нестационарная термическая модель заедания и износа эвольвентных зубчатых передач // Техника машиностроения, 1998, №1(15). - С. 54-59.
2. Каплун П.В. Способы повышения износостойкости и контактной выносливости зубчатых колёс // Вісник НТУ "ХП", 2015, № 35. – С. 67-75.
3. Юров В.М., Гученко С.А., Маханов К.М. Особенности многофазных покрытий // Национальная Ассоциация Ученых (НАУ), 2020, №51, Ч. 1. – С. 44-49.
4. Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С. и др. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц // Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44. – № 9. – С. 28–35.
5. Коростелева Е.Н., Прибытков Г.А., Гурских А.В. Исследование структуры и свойств спеченных материалов титан–медь // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спецвыпуск. – Ч. 2. – С. 75–77.
6. Борисов Д.П., Щанин П.М., Коваль Н.Н. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаливаемым катодом // Изв. ВУЗов. Физика. 1994, Т. 37, № 3. - С. 115-121.
7. Винтизенко Л.Г., Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С., Лопатин И.В., Щанин П.М. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц. // Изв. ВУЗов. Физика. 2001, Т. 44, № 9. - С. 28-35.
8. Тюменцев А.Н., Кортаев А.Д., Пинжин Ю.П. и др. Влияние низкоэнергетического ионного облучения на микроструктуру покрытий нитрида титана. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1998, № 10. - С. 92-100.
9. Goncharenko I.M., Grigoriev S.V., Lopatin I.V. et al. Surface modification of steels by complex diffusion saturation in low pressure arc discharge. //

Surface and Coatings Technology, 2003, V. 169-170. - P. 419-423.

10. Borisov D.P., Goncharenko I.M., Koval N.N., Schanin P.M. Plasma-assisted deposition of a three-layer structure by vacuum and gas arcs. // IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, V. 26, № 6. - P. 1680-1684.

11. Гончаренко И.М. Комплексное модифицирование сталей и покрытий TiN в плазме дуговых разрядов низкого давления. - Диссертация на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - Томск, 2004. - 168 с.

12. Yurov V., Shelyakov B., Guchenko S. Titanium nitride coatings on turbine shovels // The scientific heritage, 2020, No 44, P. 1. – P. 29-33.