

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

**Муратов В.С., Хамин О.Н., Ковзик Н.К.**

*ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия (443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244), e-mail: out87@mail.ru*

В работе апробированы различные варианты подготовки поверхности изделий из низколегированных сталей перед нанесением на них износо- и коррозионностойких ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов. Исследованы варианты механического и электрохимического полирования поверхностей изделий из сталей 40X и 65Г после их термической обработки (закалка+среднетемпературный отпуск) перед нанесением покрытий. Износостойкое и коррозионностойкое покрытие TiAlN наносили методом КИБ на вакуумной установке ННВ-6,БИ1. Исследовали микротвердость, толщину, адгезию, пористость покрытий и стойкость изделий с покрытиями в эксплуатационных условиях. Установлено: износостойкость и коррозионная стойкость сталей, легированных элементами, расширяющими гамма-область (сталь 65Г) после электрохимического полирования ниже, чем после механического полирования, а для сталей, легированных элементами, сужающими гамма-область (сталь 40X) – практически одинакова.

Ключевые слова: низколегированные стали, термическая обработка, механическое и электрохимическое полирование, ионно-плазменные покрытия, износостойкость, коррозионная стойкость.

## **THE IMPACT OF TECHNOLOGY OF PREPARATION OF A SURFACE WEAR RESISTANCE AND CORROSION RESISTANCE OF LOW-ALLOY STEELS WITH ION-PLASMA COATINGS**

**Muratov V.S., Khamin O.N., Kousik N.K.**

*FHBO of higher professional education "Samara State technical University", Samara, Russia, 443100, Samara, ul. Molodogvardeyskaya, 244), e-mail: out87@mail.ru*

In the work of the tested different ways of preparation of a surface of products from low-alloyed steels before applying them to abrasion and corrosion ion-plasma coatings on the basis of refractory metals. The investigated options mechanical and electrochemical polishing of surfaces of products made of steel 40X and 65G following heat treatment (hardening+medium temperature holidays) before application of coatings. Wear resistant and corrosion resistant TiAlN coating was applied using the method of CIB on the vacuum unit ННВ-6,1. Investigated the micro-hardness, thickness, adhesion, porosity of coatings and durability of products with coatings in operating conditions. Installed: wear resistance and corrosion resistance of steels, alloyed elements that extend gamma region (steel 65G) after electrochemical polishing lower than after mechanical polishing, and for steels, alloyed elements, narrowing gamma region (steel 40X) – practical constant.

Keywords: low-alloy steel, heat treatment, mechanical and electrochemical polishing, ion-plasma coatings, wear resistance, corrosion resistance.

### **Введение**

Современные конструкционные материалы должны удовлетворять одновременно совокупности эксплуатационных, технологических и экономических требований. Высокие эксплуатационные показатели будут иметь материалы, обладающие достаточным уровнем конструкционной прочности, как совокупности критериев прочности, надежности и долговечности [3]. При этом повышение конструкционной прочности материалов заключается не столько в повышении только показателей прочности, сколько в том, как при высоких показателях прочности обеспечить высокие показатели пластичности и вязкости,

т.е. надежность материала. Технологические требования определяют трудоемкость изготовления изделий. Стоимость материала и объем производства составляют основные экономические требования.

Совместно вышеперечисленным требованиям в наибольшей степени отвечают стали. Стали сочетают высокую жесткость с достаточной статической и циклической прочностью, показатели которых можно регулировать в широком диапазоне, изменяя концентрацию углерода и легирующих компонентов и технологию термической, химико-термической и других методов упрочнения. Стали являются наиболее технологичным материалом при обработке процессами заготовительного производства (литье, обработка давлением, сварка), механической обработкой со снятием и без снятия стружки, методами физической и химической обработки и высокими технологиями. Углеродистые и низколегированные стали недороги по сравнению с другими конструкционными материалами. Соответственно в настоящее время они нашли широкое применение для изделий, эксплуатируемых в условиях статических и циклических знакопеременных нагрузок.

Эффективность использования низколегированных сталей еще более очевидна при их термическом и поверхностном упрочнении различными методами. Термическая обработка (ТО) на максимальную твердость обеспечивает высокую износостойкость изделий. Улучшаемые низколегированные стали успешно используются для деталей машин, работающих в условиях циклических и ударных нагрузок. Значительную нишу в машиностроении занимают также стали со структурами бейнита и троостита после ТО. Еще более высокие эксплуатационные свойства приобретают изделия из низколегированных сталей при их поверхностном упрочнении после термической обработки.

Все современные методы обработки поверхности условно можно разделить на две группы: изменение состава и структуры поверхности (механические, термические, химикотермические); нанесение покрытий (денотационные, газоплазменные, химические, физические, гальванические) [2]. Наиболее эффективными методами получения высококачественных износостойких, коррозионностойких, триботехнических и оптических покрытий на изделия сложной геометрии являются физические методы нанесения покрытий.

В современной технологии физических методов нанесения покрытий все большее предпочтение получают вакуумно-плазменные методы [1,2]. Основное и принципиальное отличие этих методов от других заключается в использовании при нанесении покрытий напылением нетермических методов активации процессов. Это позволяет получать высококачественные разнофункциональные покрытия при сравнительно низких температурах с высокой адгезионной прочностью. Наивысшая адгезионная прочность вакуумно-плазменных покрытий достигается при использовании метода КИБ (конденсация

вещества из паровой фазы с ионной бомбардировкой), при котором получение ионной компоненты металла происходит в плазме электродугового разряда. Методом КИБ можно получать ионно-плазменные покрытия из различных тугоплавких металлов и их химических соединений простого и сложного состава с заданной структурой, высокой адгезией к основе, с заданной толщиной при значительной скорости осаждения покрытия. Возможность плавного регулирования в заданных пределах кинетической энергии конденсирующихся частиц (до 100 эВ) является принципиальным отличием и преимуществом данной технологии от других технологий нанесения покрытий.

При нанесении ионно-плазменных покрытий на заготовки и изделия из металлических материалов их поверхность должна отвечать определенной структуре и свойствам, определяющим качество поверхности. Характеристики качества поверхности делятся на физико-химические и геометрические [4]. К основным физико-химическим характеристикам относятся: химический и фазовый составы, микроструктура, поверхностное напряжение, электродный потенциал, микротвердость, адгезия, электрические, магнитные, оптические. К основным геометрическим характеристикам поверхности относятся: макрогеометрия, волнистость, шероховатость, субмикрощероховатость. При этом наиболее важными в практическом плане являются вопросы структурной однородности поверхности и ее шероховатость. Первое обеспечивает однородность свойств покрытий по поверхности изделия, а минимальная шероховатость – адгезионную прочность, стойкость при окислении и абразивном износе. Вместе с тем при одинаковом значении шероховатости после заготовительных операций, макрогеометрия поверхности после таких финишных операций как механическое шлифование и полирование будет зависеть от ее твердости. При механической обработке поверхности с низкой твердостью доля процессов срезания микровыступов будет меньше, чем доля их пластической деформации. Соответственно, будет происходить загиб микровыступов от пластической деформации, а не их срезание. При загибе микровыступов под ними остаются различные загрязнения даже после тщательной очистки поверхности перед нанесением покрытий. Этим объясняется снижение качества ионно-плазменных покрытий и наличие микродуг на поверхности изделий после их нанесения. Этот негативный эффект еще более усиливается в случае структурной неоднородности поверхности объектов под нанесение ионно-плазменных покрытий. Соответственно, при нанесении таких покрытий важными являются вопросы повышения твердости и снижения шероховатости поверхности металлических материалов перед нанесением ионно-плазменных покрытий. Эти вопросы могут быть решены за счет термического упрочнения и использования различных методов снижения шероховатости

поверхности (механические, методы поверхностного пластического деформирования, электрохимические).

Механические и подобные им методы снижения шероховатости поверхности весьма трудоемки для обработки изделий сложной геометрии. Кроме того, при интенсивных режимах шлифования и полирования возможно протекание структурно-фазовых превращений и изменение свойств в поверхностном слое материала [5]. Электрохимическое полирование имеет ряд преимуществ перед механическим полированием. Во-первых, при правильно подобранном составе электролита и режимах при электрополировании процесс растворения металла в углублениях происходит существенно менее интенсивно, чем выступов, что повышает надежность и долговечность изделий после такого вида обработки по сравнению с механическими методами. Во-вторых, процесс электрополирования гораздо менее трудоемкий, чем механическое полирование, особенно для заготовок и изделий сложной геометрии. В-третьих, отсутствуют наклеп поверхности и риски как при механическом полировании. Вместе с тем при использовании электрохимического полирования поверхности заготовок и изделий перед нанесением ионно-плазменных покрытий следует учитывать возможное воздействие состава электролита и параметров обработки на физико-химическое состояние поверхности. При электрохимическом полировании происходит преимущественное растворение металла вокруг пустот и неметаллических включений, и тем самым увеличиваются их размеры. При этом у многофазных сплавов может заметно измениться полируемость при незначительном изменении концентрации легирующего компонента в конкретном электролите.

### **Цель исследования**

Целью исследования в настоящей работе является апробация различных вариантов подготовки поверхности изделий из низколегированных сталей после термической обработки перед нанесением на них износостойких и коррозионностойких ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов. Исследованы варианты механического и электрохимического полирования поверхностей термообработанных изделий из этих сталей перед нанесением покрытий.

### **Материалы и методы исследования**

В качестве объектов исследований выбраны низколегированные стали 40Х и 65Г. Изделиями из этих сталей являлись ножи для буров (остро заточенные плоские пластины). Ножи подвергались закалке и среднетемпературному отпуску по традиционным режимам для этих сталей. Механическое полирование реализовано в два этапа: тонкое шлифование; тонкое полирование. Тонкое шлифование выполнено на вращающемся диске с абразивной бумагой различной зернистости (от 60 до 20 мкм). Тонкое полирование выполнялось на

круге из ворсистой ткани с суспензией гамма-оксида алюминия в дистиллированной воде. На всех этапах механического полирования использована полировальная головка со скоростью вращения кругов до 4500 об/мин. Конструкция полировальной головки обеспечивала сохранение угла заточки при изготовлении заготовки ножа. Электрохимическое полирование осуществлялось в электролите, в состав которого входили ортофосфорная кислота  $H_3PO_4$  и  $CrO_3$ . Полируемые изделия являлись анодом, в качестве катода использована пластина из нержавеющей стали. Плотность тока составляла  $1a/cm^2$ . Длительность полирования не превышала 1 мин. После механического и электрохимического полирования шероховатость поверхности для всех вариантов ножей буров составляла  $R_a = 0,32$  мкм.

На ножи буров методом КИБ наносили износостойкое и коррозионностойкое покрытие  $TiAlN$ . Использовали катоды из титана марки ВТ 1-00 и алюминия марки А7.

Перед нанесением покрытий образцы подвергались ультразвуковой очистке в моющем водном растворе и в бензине БР-1 с последующей сушкой и протиркой спиртом. После нагрева в сушильном шкафу до температуры 150–200 °С заготовки помещались в вакуумную камеру. Нанесение ионно-плазменных покрытий выполнялось на модернизированной вакуумной установке ННВ-6,6-И1.

Технология собственно нанесения ионно-плазменных  $TiAlN$  покрытий включала следующие стадии:

- ионная очистка ионами титана до заданной температуры при следующих параметрах.  $P_{ост} = 1 \cdot 10^{-3}$  Па; ток дуги испарения  $J_d = 75$  (А); напряжение на подложке  $U = 1000$  (В); ток фокусирующей катушки  $J_{\phi} \approx 0,4$  (А); температура заготовок  $T = 350 - 450$  °С;
- конденсация покрытий выполнялась при следующих параметрах: ток дуги испарителя по титану  $J_d = 75$  (А), напряжение на подложке  $U_{оп} = 120$  (В), время конденсации покрытия  $\tau = 40$  мин; температура изделия при конденсации  $T = 350 - 450$  °С, давление азота в камере  $P_N = (3 - 5) \cdot 10^{-1}$  Па.

Параметры ионной очистки и конденсации покрытий были одинаковы для всех вариантов образцов-ножей.

После нанесения покрытий оценивали следующие параметры их качества:

- на поверхности образцов-ножей из стали 65Г, прошедших электрохимическую полировку, наблюдалось наличие микродуг. На поверхности образцов-ножей для всех сталей после механической полировки микродуг практически не наблюдалось;
- микротвердость покрытий для всех вариантов образцов-ножей составила  $H_{0,05} = 18 - 25$  ГПа. Испытания на микротвердость с применением наконечника в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием проводили на приборе ПМТ-3;

- толщина покрытий для всех вариантов образцов-ножей составила 4–5 мкм. Толщину покрытий определяли металлографическим методом путем измерения на поперечных шлифах с использованием оптического микроскопа;
- отсутствие осыпания покрытий с образцов-ножей;
- одинаковый уровень адгезии для исследованных вариантов подготовки поверхности образцов-ножей и сталей. Уровень адгезии определяли методом полирования (использовали круги из бязи с пастой ГОИ при скорости полирования 30 м/с в течении 15 с) и методом нагрева (образцы-ножи нагревали до температуры 200 градусов Цельсия и выдерживали при этой температуре в течении 1 часа);
- пористость покрытий для всех вариантов образцов-ножей составила не более 2-х пор на кв. мм. Пористость покрытий определяли методом погружения по ГОСТ 9.302-79.

### **Результаты исследования**

Эксплуатационные натурные испытания образцов-ножей с ионно-плазменным покрытием TiAlN показали следующие результаты:

1. Стойкость образцов-ножей с покрытием оказалась в 1,5–3 раза выше, чем без покрытия.
2. Стойкость образцов-ножей с покрытием из стали 65Г, прошедших электрохимическую полировку, оказалась до 1,5 раз ниже стойкости образцов-ножей, прошедших механическое полирование перед нанесением покрытий.
3. У образцов-ножей, изготовленных из стали 40Х, различия в стойкости в зависимости от варианта подготовки их поверхности (механическое полирование и электрохимическое полирование) практически не наблюдалось
4. Образцы-ножи из стали 65Г показали заметную коррозию поверхности после эксплуатационных натурных испытаний. Коррозия проявилась в виде заметных пятен ржавчины, неравномерно распределенных по поверхности образцов ножей.

### **Обсуждение результатов исследования**

Полученные результаты могут быть связаны с влиянием электролита на физико-химическое и структурно-фазовое состояние поверхности низколегированных сталей и с эффектом возможного растравливания их поверхности при электрохимическом полировании.

Для проверки этого предположения была измерена микротвердость рабочей поверхности образцов-ножей после механической и электрохимической полировок перед нанесением ионно-плазменных покрытий TiAlN. Результаты измерений показали следующее:

- микротвердость образцов-ножей из стали 40Х практически одинакова после всех вариантов полирования;

- микротвердость образцов-ножей из стали 65Г после электрохимического полирования оказалась до 20 % ниже, чем у образцов-ножей, прошедших механическое полирование.

Последнее может быть связано с растравливанием поверхности образцов-ножей из стали 65Г при электрохимическом полировании и, как следствие, понижением микротвердости поверхности травления. После закалки стали с легирующими компонентами, расширяющими гамма-область (в первую очередь никель и марганец), имеют гораздо больше остаточного аустенита, чем стали с компонентами, сужающими гамма-область (например, хромистая сталь 40X). Соответственно, после низко- и среднетемпературного отпуска соответствующие фазы могут отличаться по составу и дисперсности. При электрохимическом полировании фазы с первоначально большим содержанием остаточного аустенита могут протравливаться интенсивнее, тем самым изменяя физико-механическое состояние поверхности. Поэтому поверхность образцов-ножей из стали 65Г после электрохимического полирования понизила микротвердость и коррозионную стойкость вследствие действия электролита. При нанесении ионно-плазменных покрытий на стадии ионной очистки также происходит растравливание подложки компонентами тугоплавких металлов (в нашем случае ионами титана). Нанесение высококачественного ионно-плазменного покрытия на «ослабленную» подложку из-за действия электрохимического и ионного растравливания обеспечит заданные параметры качества покрытия только в рамках его толщины. Соответственно, эксплуатационные характеристики изделия с таким покрытием будут уступать таковым для изделия с подобным покрытием на подложке более высокого качества. И это подтверждают результаты испытаний образцов-ножей, прошедших механическое полирование поверхности. Подложка этих образцов-ножей перед нанесением ионно-плазменных покрытий не подвергалась химическому воздействию, а ионное растравливание при нанесении покрытий оказало меньшее воздействие на подложку. В результате такие образцы-ножи имели такое же качественное покрытие, как и ножи после электрохимического полирования, но более качественную подложку. Это и объясняет более высокую стойкость образцов-ножей из стали 65Г после механического полирования их поверхности перед нанесением ионно-плазменного покрытия TiAlN, чем после электрохимического полирования.

Подобной картины не наблюдалось для образцов-ножей из стали 40X вследствие более высокой стабильности физико-химического состояния поверхности этой стали при электрохимическом полировании. Соответственно, и стойкость образцов-ножей из стали 40X, прошедших различную подготовку поверхности перед нанесением ионно-плазменного покрытия при одинаковом качестве этих покрытий, как показали эксплуатационные натурные испытания, оказалась практически одинаковой.

## **Заключение**

Таким образом, проведенные исследования показали, что износостойкость и коррозионная стойкость сталей с ионно-плазменными покрытиями, легированных элементами, расширяющими гамма-область (сталь 65Г), после электрохимического полирования ниже, чем после механического полирования, а для сталей, легированных элементами, сужающими гамма-область (сталь 40Х), – практически одинакова.

Соответственно, при использовании электрохимического полирования заготовок и изделий из закаленных низколегированных сталей следует учитывать влияние этого процесса обработки на состояние поверхности заготовок перед нанесением износостойких и коррозионностойких ионно-плазменных покрытий на эти стали.

## **Список литературы**

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Григорьев С.Н., Волосова М.А. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента: учебное пособие. – М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН», Янус-К, 2007. – 324 с.
3. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений / под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 2005. – 481 с.
4. Муратов В.С., Хамин О.Н., Трефилова Н.В. Формирование повышенной твердости деформируемых алюминиевых сплавов для обеспечения нанесения высококачественных ионно-плазменных покрытий // Заготовительные производства (кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). – 2014. – № 3. – С. 41-44.
5. Носов Н.В., Кравченко Б.А. Технологические основы проектирования абразивных инструментов. – М.: Машиностроение-1, 2003. – С. 200-255.

## **Рецензенты:**

Амосов А.П., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой МПМН, ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», г.Самара.

Самборук А.Р., д.т.н., профессор кафедры МПМН, ФГБОУ ВПО СамГТУ, г. Самара.