

Вопрос повышения качества, надежности и долговечности узлов и деталей оборудования является одним из основополагающих в промышленности машиностроения России. Уплотнительные устройства, часто в виде колец для установки между неподвижной частью и поворотной частью элемента, используемые во вращающемся оборудовании, предназначены разделить две среды и обеспечить герметизацию вала, передающего механическую энергию к рабочему органу механизма, типа насосов, компрессоров, с целью предотвращения утечки текучей среды. При воздействии экстремальных условий, например агрессивных сред, неблагоприятных моментов при пуске и останове компрессоров они могут легко разрушаться [1]. Кроме того, уплотнители подвержены значительному износу и могут ломаться внутри оборудования, особенно из-за большого трения, и поэтому часто требуют замены. Уплотнители изготавливаются из твердых сплавов, выполненных на основе карбидов вольфрама, титана и тантала методом порошковой металлургии. В качестве связки используется кобальт. В настоящее время в России выпускаются три группы твердых сплавов: однокарбидные – вольфрамовые, двухкарбидные – титановольфрамовые и трехкарбидные – титанотанталовольфрамовые. В настоящее время в отечественной твердосплавной промышленности проводятся глубокие исследования, связанные с расширением сферы применения и возможностью повышения эксплуатационных свойств твердых сплавов. Одним из эффективных способов увеличения срока службы изделий машиностроения является модификация свойств рабочих поверхностей, подвергающихся износу в процессе эксплуатации. Результаты экспериментальных исследований процессов износа и разрушения различных изделий при их эксплуатации показали, что надежность изделия и срок службы зависят, а нередко и полностью определяются состоянием поверхностного слоя [2, 3]. Перспективным методом обработки материалов является воздействие высокочастотной (ВЧ) плазмы пониженного давления, в результате которого происходит ионная имплантация атомов плазмообразующего газа в объем металла глубиной до 100 нм [4]. К преимуществам воздействия высокочастотной плазмы пониженного давления можно отнести: практически неограниченный ресурс работы; простое аппаратное оформление; малая продолжительность процессов обработки; возможность совмещения нескольких технологических операций; высокая плотность покрытий, равные плотности исходного материала и др. Использование в качестве рабочего тела различных плазмообразующих газов позволяет обрабатывать детали сложной конфигурации, в т.ч. и внутренние поверхности. При воздействии ВЧ плазмы пониженного давления на металлы и сплавы происходит изменение фазового состава и структуры материала, что приводит к улучшению сразу нескольких, порой противоположно направленных, свойств. Например, возможно одновременное повышение микротвердости и

усталостной прочности и долговечности. Отличительной особенностью предлагаемой технологии является использование «холодной» плазмы: газовая температура в плазменном потоке может регулироваться в диапазоне от 40 до 600 °С. Энергии ионов достаточно для залечивания микропор и микротрещин, ликвидации трещиноватого и рельефного слоев, формирования сжимающих остаточных напряжений в приповерхностном слое образца и др. В результате воздействия ВЧ плазмы пониженного давления происходит насыщение поверхностных слоев атомами плазмообразующих газов (Ar, N, O, C), образуется нанодиффузное покрытие на поверхности детали, изменяющее химический состав поверхностного слоя, структуру поверхностного слоя, микрогеометрию поверхности (шероховатость); энергетический запас поверхностного слоя. Поскольку износу подвергается поверхность уплотнительных колец необходимо провести упрочнение материала путем его газонасыщения атомами углерода и образования карбидов металлов, входящих в состав изделия. С целью повышения механических свойств деталей компрессоров обработаны образцы из уплотнительных колец, изготовленных из твердого сплава ВК8. Образец, введенный в плазму ВЧ разряда, подвергается бомбардировке ионами плазмообразующего газа и происходит рекомбинация ионов, очистка поверхности от различных загрязнений, распыление и оплавление микровыступов, залечивание микротрещин, что в свою очередь приводит к уменьшению шероховатости поверхности, к изменению состава и структуры приповерхностного слоя, что обеспечивает повышение износостойкости. Образцы были помещены в вакуумную установку, схема, которой представлена на рис. 1. Рис. 1 - Установка ПУ-ВЧЕ для полировки и очистки: 1 – ВЧ-генератор, 2 – электроды, 3 – водоохлаждаемая РК, 4 – устройство очистки аргона, 5 – карусельное устройство, 6 – обрабатываемая деталь, 7 – вакуумная камера, 8 – система откачки, 9 – система контроля-управления, 10 – термопары, 11 – система газоснабжения. Экспериментальные исследования показали, что изменения в поверхностном слое материалов приводят к изменению твердости и шероховатости. В качестве рабочего газа при исследовании процессов финишной очистки и нанополировки поверхностей использовался технически чистый аргон. Для воздействия на структуру поверхности изделия использовалась смесь газов из аргона и пропан-бутана в следующих режимах (табл. 1).

Газ	Давление, Па	Напряжение анода, кВ	Ток анода, А
1 Ar	22	7	0,5
2 Ar+C ₃ H ₈	21	7	0,5
3 Ar	26	7	0,5
4 Ar	26	5	0,5
5 Ar+C ₃ H ₈	26	5	0,35

Во всех экспериментах осуществлялась подача отрицательного потенциала на изделие порядка -20 В с целью увеличения концентрации электрического поля вблизи деталей. Образцы устанавливались перпендикулярно потоку. Для устранения побочных эффектов образцы перед плазменной обработкой при изучении состава и структуры обезжиривались и обезвоживались. Температура образца при установлении закономерностей изменения свойств поверхностного слоя от

плазменных параметров выбиралась такой, чтобы, с одной стороны, максимально интенсифицировать плазменные процессы, а с другой – чтобы при этой температуре термообработка не была доминирующим фактором. Экспериментально установлено, что время достижения рабочей температуры и получения равномерного распределения температуры по всему объёму материала составляет 15 – 20 минут, поэтому все изделия обрабатывались в плазме чистого аргона в течении 25 минут., затем 20 минут в смеси аргона с пропан-бутаном. Для определения физико-механических свойств применялось измерение микротвердости и шероховатости, исследовался рельеф и структура поверхности на субмикронном и нанометровом масштабе с помощью сканирующего нанотвердомера «НаноСкан- 3D». На базе «НаноСкан» реализован метод измерения твердости, основанный на измерении и анализе зависимости нагрузки при вдавливании индентора в поверхность материала от глубины внедрения индентора. Данный метод лежит в основе стандарта на измерение твердости ISO 14577. Для механических испытаний применяется индентор типа Берковича, который представляет из себя трехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине около 142°. Метод измерительного динамического индентирования заключается в следующем: индентор вдавливается в поверхность образца с постоянной скоростью, при достижении заданной нагрузки индентор отводится в обратном направлении. В процессе такого испытания производится запись значений нагрузки и соответствующего ей смещения индентора. Типичная для этого метода экспериментальная кривая в виде графика зависимости нагрузки (P) от глубины вдавливания (h) представлена на рис. 2. Она состоит из двух частей, соответствующих процессу нагружения и разгрузки. В рамках данного метода твердость H образца определяется уравнением: $H = \frac{P_{max}}{A_c}$ Здесь A_c – это площадь проекции отпечатка при максимальном значении приложенной нагрузки P_{max} . Построение изображения рельефа поверхности проводится в режиме полуконтактной сканирующей зондовой микроскопии. В результате сканирования строится растровое трехмерное изображение. Рис. 2 - Общий вид кривой нагружения, и схема контакта с обозначениями величин, используемых в методике расчета модуля упругости и твердости а б Рис. 3 - Рельеф третьего образца до обработки (а) и после обработки (б) С помощью метода измерительного динамического индентирования получены экспериментальные точки, через которые можно провести линию, описывающую характер изменения свойства. На рис. 1, 2 и 3 представлены графики изменения твердости в зависимости от глубины проникновения плазмохимического газа для твердого сплава ВК8, полученные в результате проведенных испытаний. Установлено, что для первого образца произошел низкотемпературный отпуск. Значение твердости уменьшилось в среднем на 56%. Для объяснения этого эффекта проведен второй эксперимент в среде чистого аргона, результаты которого показали, что твердость

увеличивается на 30%, при этом шероховатость также увеличивается на 25%. Это свидетельствует о распылении кобальта, входящего в состав сплава, при этом на поверхности проступает чистый вольфрам, поэтому происходит увеличение его твердости и шероховатости. Для исключения этих факторов уменьшено напряжение анода. Это привело (см. рис.6) к увеличению твердости на 60% и уменьшению шероховатости на 40%. Цвет изделия изменился от характерного металлического блеска к желтовато-бирюзовому цвету. Это также свидетельствует о формировании пленки на поверхности сплава. Исследование шероховатости поверхности проводилось также на нанотвердомере «НаноСкан-3D». Рис. 4 - Изменение микротвердости поверхности сплава ВК8: а - образец до обработки, б - образец, обработанный по режиму $\text{Ar}+\text{C}_3\text{H}_8$, $Q_1=1500$ см³/мин, $Q_2=1300$ см³/мин, $U=-20$ В Рис. 5 - Изменение микротвердости поверхности сплава ВК8: а - образец до обработки, б - образец, обработанный в ВЧЕ плазме аргона, $Q=2000$ см³/мин, $U=-20$ В Рис. 6 - Изменение микротвердости поверхности сплава ВК8: а - образец до обработки, б - образец, обработанный по режиму $\text{Ar}+\text{C}_3\text{H}_8$, $Q_1=2000$ см³/мин, $Q_2=1400$ см³/мин, $U=-20$ В Анализ характеристик уплотнителей, обработанных в плазме ВЧ разряда, показал, что физико-механические значения опытных образцов обладают улучшенными технологическими, эксплуатационными показателями по сравнению с контрольными при обработке изделия в смеси газов из аргона и пропан-бутана в соотношении 80% на 20%.