

Грязнов Б. Т., Зинкин А. Н.,  
Прудников В. В., Стасенко В. П.

### **Современные технологические методы повышения надежности машин микрокриогенной техники**

Непрерывно возрастающие требования к качеству выпускаемых машин и механизмов, связанные с необходимостью повышения их долговечности и надежности, в значительной степени определяются эксплуатационными характеристиками их деталей, составляющих множество кинематических пар, находящихся в состоянии трения. Требуемые свойства деталей пар трения могут быть достигнуты различными технологическими методами, в том числе нанесением на детали износостойких и антифрикционных покрытий. При выборе метода воздействия на свойства деталей пар трения необходим как детальный учет факторов, определяющих взаимодействие разнородных материалов, так и факторов, влияющих непосредственно на величину силы трения.

В криогенной технике широко применяются комбинированные узлы трения, содержащие различные виды фрикционных пар (металл-металл, металл-износостойкий материал, металл-самосмазывающийся материал) и работающие в условиях сухого трения. Повышение износостойкости этих узлов ограничивается рядом условий, таких как невозможность применения каких либо смазочных сред, в том числе газовых, в связи с работой узлов в условиях высокого вакуума и низких температур, а также жесткими ограничениями по виду применяемых материалов.

Одним из основных направлений повышения износостойкости и надежности узлов трения является разработка методов повышения триботехнических свойств несмазываемых пар трения скольжения путем нанесения многослойных комбинированных покрытий на поверхности деталей с использованием методов КИБ, магнетронного распыления и ионной имплантации в одновакуумном цикле. В качестве материалов для покрытий используются металлы, полимеры, твердые смазки.

Эффективность применения различных методов модифицирования поверхностных слоев пар трения или использования технологии нанесения многослойных комбинированных покрытий во многом определяется правильным выбором материалов с оптимальными триботехническими свойствами для несмазываемых узлов трения. При выборе материала для антифрикционного покрытия приходится решать противоречивую задачу: покрытие должно иметь максимальную адгезию к подложке и минимальную к материалу, работающему в паре трения с этим покрытием.

В качестве решения такой задачи могут быть применены следующие методы: напыление многослойных покрытий, последовательность которых обеспечивает постепенный переход от покрытия, обладающего хорошими адгезионными свойствами по отношению к подложке, к покрытию с хорошими антифрикционными свойствами; модифицирование поверхности подложки путем ионной имплантации атомов металла, родственного антифрикционному покрытию; использование самосмазывающихся материалов, играющих роль твердой смазки.

При выборе материалов и метода создания антифрикционного покрытия мы опирались на разработанные в работах [1, 2] методы определения энергии и силы адгезионного взаимодействия различных материалов, адгезионной составляющей коэффициента сухого трения для пар трения металл-металл и металл-самосмазывающийся материал и на результаты расчетов адгезионных и триботехнических характеристик контакта стальных поверхностей с износостойкими покрытиями и самосмазывающимися материалами из ряда тех, которые широко применяются в микрокриогенной технике. На основе разработанных теоретических методов была создана и апробирована инженерная методика расчета комплекса триботехнических и адгезионных характеристик для сплавов и соединений, широко используемых в микрокриогенной технике, криогенном и компрессорном машиностроении. Применение данной методики и соответствующего программного обеспечения позволило на стадии технологической проработки изделий выбирать материалы деталей и покрытий с оптимальными адгезионными и триботехническими характеристиками, обеспечивающими высокую износостойкость и работоспособность узлов трения.

В результате проведенных расчетов были сделаны следующие рекомендации:

- в качестве оптимального антифрикционного и износостойкого материала в узлах сухого трения в паре трения со сталью рекомендуется нитрид молибдена  $\text{Mo}_2\text{N}$ ;

- для дальнейшего понижения коэффициента трения и уменьшения изнашивания деталей в период приработки рекомендуется применять твердую смазку на основе дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$ , который при высоких триботехнических свойствах химически неактивен по отношению к нитриду молибдена;

- для повышения адгезии нитрида молибдена к стали необходимо выделить материал для промежуточного слоя, который обладал бы хорошими адгезионными свойствами как по отношению к стали, так и по отношению к нитриду молибдена. Этому критерию из широкого ряда материалов, для которых были проведены расчеты, удовлетворяют только переходные металлы. Лучшим, с этой точки зрения, является молибден. Для повышения адгезионной связи молибдена с поверхностью из стали рекомендуется применить метод модифицирования стальной поверхности путем имплантации ионов молибдена.

Для проверки разработанной теории были проведены в условиях сухого трения триботехнические испытания по определению коэффициента трения пар на основе стали 95X18 и материалов с покрытиями из  $\text{TiN}$ ,  $\text{Cr}_2\text{N}$ ,  $\text{Mo}_2\text{N}$  и многослойными покрытиями  $\text{Mo} - \text{Mo}_2\text{N} - \text{MoS}_2$ . Однослойные покрытия из нитридов титана, хрома и молибдена были получены методом КИБ на установке ННВ-6.6И1, а покрытия  $\text{Mo} - \text{Mo}_2\text{N} - \text{MoS}_2$ , на специально созданной установке для нанесения многослойных комбинированных ионно-вакуумных покрытий.

Анализ результатов испытаний показал, что в стабильном режиме при одинаковых условиях испытаний (скорости скольжения и нагрузке) наименьшими коэффициентами трения по стали 95X18 обладает многослойное комбинированное покрытие  $\text{Mo} - \text{Mo}_2\text{N} - \text{MoS}_2$  и покрытие из нитрида молибдена, а затем идут покрытия из нитрида хрома и нитрида титана. Данные выводы находятся в полном соответствии с результатами теоретических расчетов коэффициента трения для данных покрытий в паре со сталью. Высокие триботехнические свойства многослойного покрытия и покрытия из нитрида молибдена проявились также и в том, что они выдерживают более высокие нагрузки до наступления режимов микросхватываний и заедания.

С целью реализации рекомендаций по оптимальному выбору материалов и покрытий для комбинированных узлов трения и использования технологии нанесения многослойных покрытий в условиях серийного производства в АО «Сибкриотехника» была спроектирована и изготовлена установка для обработки поверхностей деталей машин. Установка построена по модульному принципу. Модульный принцип построения

установки дал возможность проведения нескольких видов обработки поверхностей деталей и инструмента, в том числе многослойного нанесения ионно-плазменных покрытий с применением КИБ, магнетронного распыления и ионной имплантации в едином вакуумном цикле. Получаемые при этом покрытия характеризуются высокой адгезией с деталью, равномерностью по толщине на всей обрабатываемой поверхности, высокой износостойкостью, хорошей прирабатываемостью и улучшенными антифрикционными свойствами.

Использование данной установки для модификации поверхностей трения в комбинированном узле трения изделия - сублиматор позволило увеличить ресурс изделия в 1.5 раза.

Таким образом, разработка теоретических методов определения адгезионных и триботехнических характеристик различных материалов и практика модификации поверхности различных деталей машин микрокриогенной техники показали, что развитие технологических методов, совмещающих несколько операций ионно-плазменной обработки поверхностей, при оптимальном выборе материалов на основе разработанных методов позволяет получать поверхности трения с заданными свойствами при нанесении многослойных и композиционных покрытий, тем самым давая возможность увеличивать ресурс работы узлов трения и машин в целом. Разработанная в АО «Сибкриотехника» технология модификации поверхностей трения деталей машин микрокриогенной техники путем нанесения многослойных покрытий и установка для их нанесения обеспечивают существенное улучшение триботехнических характеристик узлов трения и успешно используются на предприятиях микрокриогенного, криогенного, компрессорного и других отраслей машиностроения, а также на нефтеперерабатывающих предприятиях. Организация серийного производства разработанных установок для нанесения многослойных покрытий и их применение на предприятиях машиностроения позволят значительно увеличить ресурс и надежность выпускаемых машин и механизмов.

Библиографический список

1. Грязнов Б. Т., Зинкин А. Н., Стасенко В. П., Вакилов А. Н., Прудников В. В., Прудникова И. А. Разработка методов повышения триботехнических характеристик несмазываемых узлов трения // Трение и износ. 1998. Т. 19. № 4. - С. 440-447.
2. Грязнов Б. Т., Зинкин А. Н., Прудников В. В., Стасенко В. П. Технологические методы повышения долговечности машин микрокриогенной техники. - Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 2009. - 272 с.