

узлов трения сельскохозяйственной техники обеспечивает применение низкоразмерных модификаторов на основе природных силикатов и полимер-олигомерных фторсодержащих продуктов.

Abstract

Composite lubricants for the operation of automotive and agricultural machinery

The compositions of hardlubricant coatings, motor and viscous lubrications guaranteeing rising life time of friction unit running in condition of mechanochemical wear are worked up. The application of lowmeasuring modifiers on the basis of natural silicates and polimer-oligomeric fluorine-containing article is support specific effect of rising life time of tribotechnical systems of agricultural equipment.

УДК 631.3.02

ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Лойко В.А., к.т.н., доцент, **Лизун А.В.**, магистрант
*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Проблемы борьбы с износом весьма актуальны и для нашей республики, как страны с высоким уровнем развития машиностроения и практически при полном отсутствии горнодобывающей и горно-металлургической промышленности. Наиболее остро эти проблемы проявляют себя в автомобильной и тракторной отраслях, являющихся производствами с серийным и массовым характером.

Статистика показывает, что более 80% машин и механизмов выходят из строя в результате износа деталей, работающих в условиях различных видов трения [4].

Наиболее характерная особенность покрытий, наносимых вакуумно-плазменным методом, – это отсутствие переходной зоны между покрытием материалом прецизионной детали. Это обстоятельство является весьма важным, так как создается возможность придать рабочим поверхностям детали комплекс дополнительных свойств без снижения параметров шероховатости поверхности.

Возможность широкого варьирования температуры (200-500 °С) в зонах осаждения позволяет использовать вакуумно-плазменные методы в качестве метода восстановления прецизионных деталей с различными геометрическими параметрами без изменения структуры металла детали, что позволяет исключить последующую термическую и механическую обработку.

Метод вакуумно-плазменного напыления универсален также и с точки зрения возможности нанесения гаммы однослойных, многослойных и композиционных покрытий. Следует также отметить относительно высокую скорость формирования покрытий и безопасность вакуумно-плазменного напыления для окружающей среды, т.к. процесс нанесения реализуется в вакуумной камере, что предотвращает выброс вредных веществ для человеческого организма и окружающей среды.

Метод основан на генерации вещества катодным пятном вакуумной дуги сильно-точного низковольтного разряда, развивающегося преимущественно в парах материала электрода. Покрытие является продуктом плазмохимических реакций ионов металла и реакционного газа, молекулы которого в результате соударения с ионами металла на поверхности подложки частично ионизируются. Все процессы испарения, образования соединения, ионной бомбардировки и конденсации покрытия происходят в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом. Катод изготавливают из тугоплавкого материала, подлежащего испарению. Покрытия методом вакуумно-плазменного напыления наносят в две стадии: на первой очищают поверхность подложки, бомбардируя ее ионами испаряемого электрода, ускоренными до энергии 1-3 кэВ [3]; на второй происходит собственно конденсация покрытий. Метод конденсации с ионной бомбардировкой применяется для нанесения покрытий из переходных металлов IV-VI А групп периодической системы (Ti, Cr, Zr, V, Mo) и их тугоплавких соединений (оксидов, нитридов, карбидов и др.) на металлические детали сельскохозяйственной техники.

Главным преимуществом представленного метода является сохранение параметров микрорельефа поверхностей детали и малая толщина слоя покрытия (3-10 мкм), что позволяет исключить последующую механическую обработку восстановленной детали.

Для восстановления прецизионных деталей применяются износостойкие вакуумно-плазменные покрытия на основе молибдена (Mo) марки МЧВП ГОСТ 27266-87, хрома (Cr), титана (Ti), вольфрама (W). Сравнительный анализ износостойких покрытий на основе молибдена (Mo), хрома (Cr), титана (Ti), вольфрама (W) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства металлов износостойких покрытий

Параметр	Молибден (Mo)	Хром (Cr)	Титан (Ti)	Вольфрам (W)
Атомная масса	95,94	51,996	47,867	183,84
Плотность, кг/м ³	10200	7190	4510	19300
Температура плавления, °С	2620	1856	1668	3410
Теплоемкость, кДж/(кг·°С)	0,255	0,46	0,527	0,134
Ковалентный радиус, Å	1,30	1,18	1,32	1,30
Работа выхода электронов, эВ	4,37	4,58	4,38	4,55
Термический коэффициент линейного расширения	$(5,8-6,2) \cdot 10^{-6}$	$8,24 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$
Твердость по Бринеллю, МН/м ²	1500-1600	700-900	1150-1650	200-230
Модуль упругости, ГН/м ²	285-300	260-280	240-265	350-400
Рекристаллизующий отжиг	не приводит к хрупкости	приводит к хрупкости	приводит к хрупкости	приводит к хрупкости

Анализ приведенных физико-механических свойств позволяет заключить, что, несмотря на достаточно высокую температуру плавления, упрочняющие вакуумно-плазменные покрытия на основе молибдена применять целесообразнее, нежели покрытия на основе титана либо хрома (в чистом виде).

За счет более низкой, чем у молибдена, температуры плавления, вакуумно-плазменные покрытия на основе титана имеют неоднородную структуру и толщину в вертикальном сечении слоя покрытия. Данные структурные недостатки возникают за счет капельной составляющей расплавленного металла в плазменном потоке. Капли расплавленного металла неспособны образовывать устойчивые химические соединения с реакционным газом вблизи поверхности подложки. За счет капельных включений наблюдается перегрев

покрытия и материала подложки, что значительно снижает эксплуатационные свойства вакуумно-плазменного покрытия. Покрытия на основе молибдена не содержат капельной составляющей из-за более высокой, по сравнению с титаном, температуры плавления.

За счет высокой твердости, высокого модуля упругости, низкого коэффициента линейного расширения, отсутствия капельных включений покрытия нитрида молибдена являются оптимальными для восстановления прецизионных деталей автотракторной техники.

Толщина пленки напыленного материала является одним из важнейших параметров, определяющих свойства покрытия. Так же имеет немаловажное значение равномерность напыленного покрытия. Равномерность пленки влияет на физико-механические, триботехнические свойства покрытия, износостойкость, следовательно, и на ресурс восстановленной детали.

Учитывая специфику процесса нанесения вакуумно-плазменных покрытий на детали типа тел вращения, которые должны вращаться относительно оси плазменного потока, не представляется возможным определение скорости осаждения покрытия традиционными методами исходя из линейной зависимости толщины пленки от интенсивности испарения и времени испарения.

В основе методики расчета толщины покрытия лежит закон косинусоидального распределения плотности потока частиц в пространстве. В общем виде расчетная схема для определения функции распределения конденсата на подвижной подложке изображена на рисунке 1.

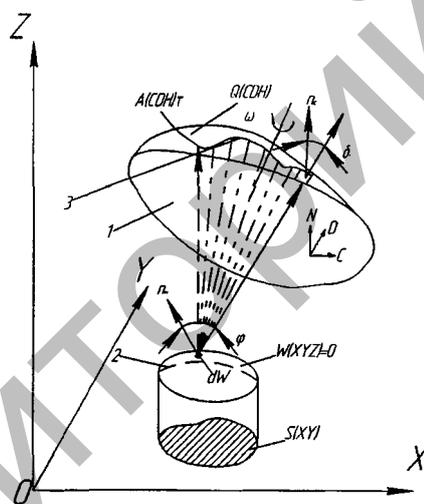


Рисунок 1 – Схема для определения функции распределения конденсата на подвижной подложке произвольной формы для объемного испарения: 1 – приемная поверхность Q, система координат CDH; 2 – поверхность w испарения, система координат wxyz; 3 – траектория движения точки A подложки за время осаждения конденсата; n_2 , n_w – нормали к поверхностям и приемной; ω – скорость перемещения точки A (скорость вращения карусели подложек)

Толщина слоя покрытия вакуумно-плазменного покрытия согласно известной методике расчета:

$$t = \frac{M}{\pi \gamma_n} \int_0^{\tau} d\tau \iint \frac{\cos^3 \varphi \cdot \cos \theta}{|\tau|^2} dF .$$

Для закона $\cos^b \varphi$ распределения конденсата, подынтегральное выражение уравнения (1)

$$|\tau|^{-2} \cos \theta dF = I [XYZ(XY)] = I . \quad (1)$$

Определяется следующим образом:

$$I = \frac{\left[(C-X) \frac{dW}{dx} + (D-Y) \frac{dW}{dy} + (H-Z) \frac{dW}{dz} \right]^b \left[(C-X) \frac{dQ}{dC} + (D-Y) \frac{dQ}{dD} + (H-Z) \frac{dQ}{dH} \right]}{\left[\sqrt{\left(\frac{dW}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dW}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dW}{dz} \right)^2} \right] \left[(C-X)^2 + (D-Y)^2 + (H-Z)^2 \right]^{\frac{b-1}{2}} \sqrt{\left(\frac{dQ}{dC} \right)^2 + \left(\frac{dQ}{dD} \right)^2 + \left(\frac{dQ}{dH} \right)^2}}, \quad (2)$$

Примем следующие допущения: расстояние от поверхности испарения до поверхности конденсации значительно меньше длины свободного пробега молекул в вакуумном объеме при рабочих давлениях и температурах, коэффициент конденсации равен единице, распределение конденсата для любой элементарной площади поверхности испарения подчиняется закону $\cos^b \varphi$, эмиссионные характеристики любой элементарной площадки испарения одинаковы. Тогда получим для величины t :

$$t = \int_0^{r_1} d\tau \iint_{s(XY)} I[XYZ(XY)] \left[1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} dXdY. \quad (3)$$

Допущение, что эмиссионные характеристики каждой элементарной площадки $dXdY$ поверхности испарения $W(XYZ)=0$ одинаковы, на практике выполняется не всегда. Причины этого заключаются в следующем:

- 1) неравномерность процессов притока тепла и теплоотвода данного материала в течение испарения приводит к изменению формы поверхности испарения и соответственно изменению распределения конденсата на подложке;
- 2) необходимость теплофизических характеристик испаряемого материала (его морфологии, структуры, фазового и химического состава) приводит к перегреву отдельных участков исходного материала.

Изменение формы поверхности испарения можно учесть путем введения параметрической зависимости координат XYZ поверхности испарения от времени. Неоднородность теплофизических характеристик исходного материала – введением в подынтегральное выражение функции $M(XY)$, характеризующей количество вещества, испаренного из точки поверхности испарения в зависимости от положения на поверхности.

Тогда закон распределения конденсата для приемной поверхности, по которой движется точка A с координатами $c = f_1(\omega\tau)$, $c = f_2(\omega\tau)$ для объемной поверхности испарения (катода), изменяющей свою форму в процессе испарения и имеющей отличающуюся от точки к точке характеристику, описывается системой уравнений

$$t = \frac{1}{\pi\gamma_n} \int_0^{\tau} d\tau \iint_{s(XY)} M(XY) I[XYZ(XY)] \left[1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} dXdY, \quad (4)$$

$$C = f_1(\omega\tau), \quad D = f_2(\omega\tau), \quad Q(CDH) = 0,$$

$$X = f_3(\tau), \quad X = f_4(\tau), \quad Z = f_5(\tau).$$

Приведенная методика позволяет математически определить толщину слоя вакуумно-плазменного покрытия осаждаемого на детали типа тел вращения. Исходными данными для определения толщины слоя покрытия является параметры, характеризующие конфигурацию и размеры восстанавливаемой детали, угловая скорость вращения детали, время испарения.

На стадии разработки технологии восстановления прецизионной детали вакуумно-плазменным напылением необходимо выбирать оптимальные режимы нанесения покрытий с точки зрения скорости осаждения и микротвердости вакуумно-плазменных покрытий. При проектировании технологии нанесения покрытий на прецизионные детали целе-

сообразно учесть не только конструктивные параметры вакуумной установки и устройства вращения деталей в плазменном потоке, но и влияние параметров технологического процесса на скорость осаждения слоя покрытия (рисунок 2, 3)

Проведенные исследования скорости осаждения покрытий на основе молибдена позволяют производить выбор оптимальных режимов нанесения покрытий на основе молибдена и его соединений.

Покрытие наносилось методом низкотемпературного плазменно-вакуумного напыления на оборудовании «Булат-6», в качестве исходного материала использовали расходный катод из технически чистого молибдена марки МЧВП ГОСТ 27266-87. Температуру измеряли ХА-микротермопарой и пирометром «Смотрич». В качестве образцов использовались диски Ø 10 мм и высотой 5 мм из стали 40 ГСТ 1050-87. Поверхности образцов перед нанесением покрытий готовились по технологии препарирования металлографических шлифов, обезжиривались моющими составами в ультразвуковом поле УЗУ-0,25, промывали этиловым спиртом и просушивали в сушильном шкафу СНОЛ-3,5 в течение 10 минут при $T = 423-473$ °К. Режим нанесения покрытия $U_n=50В$, $P=4..5Па \times 10^{-2}$, $J\phi=1А$, $Jd=280А$, реакционный газ – азот (N_2).

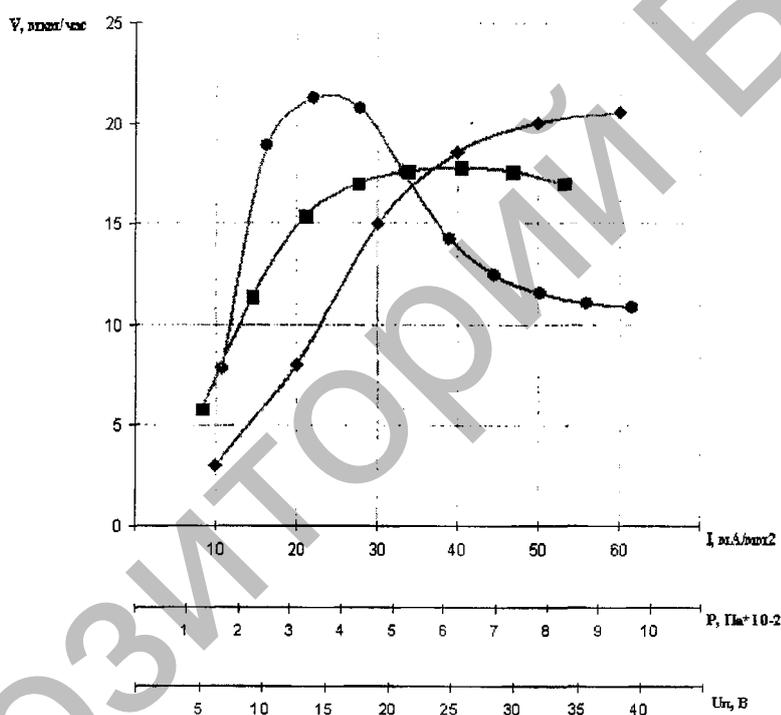


Рисунок 2 – Зависимость скорости осаждения покрытия (V , мкм/час) от плотности ионного тока -- ◆ (I , мА/мм²), потенциала подложки -- ■ (U_n , В), давления реакционного газа -- ● (P , Па×10⁻²)

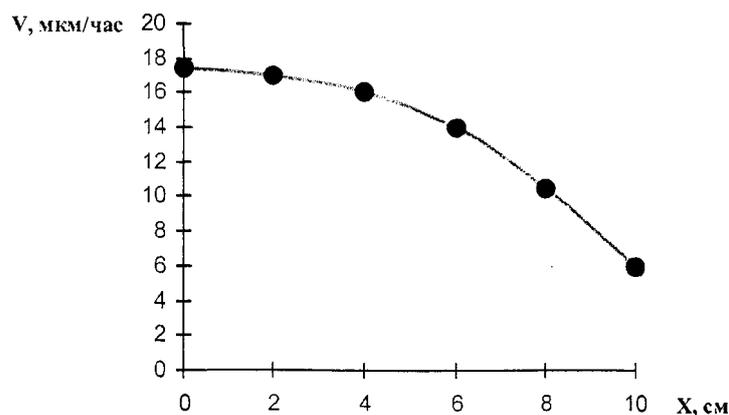


Рисунок 3 – Зависимость скорости осаждения покрытия (V , мкм/час) от удаления от оси плазменного потока (x , см)

Качество обезжиривания контролировалось измерением краевого угла смачивания поверхности каплей дистиллированной воды. Краевой угол смачивания не более 5-10 град.

Толщина слоя контролировалась металлографическим методом на поперечных шлифах при увеличении $\times 1500$. Скорость осаждения вакуумно-плазменного покрытия определялась методом математического деления толщины покрытия на время нанесения покрытия.

Адгезионная прочность контролировалась качественным путем, методом нанесения сетки цапапин и соответствовала ГОСТ 9.302-88.

В работе приведена модель расчета толщины слоя покрытия, учитывающая кинематические характеристики вращающихся деталей и конструктивные параметры вакуумной камеры, представлены экспериментальные зависимости скорости нанесения покрытия от параметров технологического процесса нанесения (U_n , J_d , P).

На основании приведенных результатов работы представляется возможным проектирование технологических процессов восстановления прецизионных деталей с сохранением заданного класса точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лизун А.В. и др. Восстановление прецизионных пар гидроаппаратуры автотракторной техники методом вакуумно-плазменного напыления. // Материалы международной научно-технической конференции «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях» – Киев, 2008.
2. Лизун А.В. и др. Совершенствование технологии и материала композиционных вакуумно-плазменных покрытий на основе молибдена. // Материалы студенческой научной конференции. – апрель 2008. УО БНТУ.
3. Буйкус К.В., Ивашко В.С., Лизун А.В. Заявка на изобретение № u20070797. // Устройство для определения жесткости пружин. УО БГАТУ 2008 г.
4. Комаров, А.А. Надежность гидравлических систем. // Вестник машиностроения. 1999. – 120 с.
5. Лойко, В. А. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве. // Издание УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». 2007. – 191 с.
6. Любимов, Г.А. Катодное пятно вакуумной дуги. // Г.А. Любимов, В.И. Раховский // Успехи физических наук. – 1978. – 705 с.

Аннотация

Вакуумно-плазменное покрытие на основе молибдена при восстановлении прецизионных деталей

В статье рассмотрены особенности обоснования толщины слоя вакуумно-плазменных покрытий на основе молибдена при восстановлении прецизионных деталей сельскохозяйственной техники, приведена математическая модель расчета толщины вакуумно-плазменного покрытия, представлены зависимости скорости осаждения покрытия от технологических параметров нанесения.

Abstract

Vacuum-plasma coatings based on molybdenum recovery of precision parts

The article deals with features justify the thickness of the layer vacuum-plasma coatings based on molybdenum recovery of precision parts of agricultural machinery, provides a mathematical model for calculating the thickness of a vacuum-plasma coatings are presented depending on coating deposition rate of technological parameters of the application.

УДК 531.4

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ПОЛУЧЕНИЮ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Толочко Н.К., д. ф.-м. н., профессор

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Прокопчук Н.Р., д. х.н., профессор, член-кор. НАН Беларуси

*Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Крауклис А.В., к. ф.-м. н., **Становой П.Г.**

*Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь*

Неотъемлемой составной частью технологического процесса изготовления машин является окраска. Лакокрасочные покрытия предохраняют машины от коррозионного воздействия внешней среды во время эксплуатации (атмосферы, воды, почвы) и придают им внешний вид в соответствии с требованиями технической эстетики. Окрашиванию подлежат внутренние полости деталей, соприкасающихся с маслами, а также крышки и пробки маслозаливных горловин для предохранения от коррозионного воздействия нефтепродуктов; наружные поверхности деталей, подвергающиеся негативному воздействию повышенных температур, солнечного излучения, химически агрессивных веществ (газов, минеральных удобрений, пищевых продуктов и т.д.).

Качество лакокрасочных покрытий зависит от состояния поверхности перед окрашиванием, способа окрашивания и свойств лакокрасочных материалов.