

4 – с использованием формулы профессора В.В. Гуськова

$$F_k = \int_0^{L_{np}} b f_{ck} q_x \left(1 + \frac{f_{п}}{ch \frac{\delta x}{k_r}} \right) th \frac{\delta x}{k_r} dx.$$

Как видно из графика, все зависимости $\varphi_{кр} = f(\delta)$ в пределах реальных величин буксования (0...0,4) примерно одинаково описывают процесс взаимодействия ведущего колеса с грунтом. Разница между ними существует при значительных величинах буксования (от 0,4 и выше).

Уменьшение $\varphi_{кр}$ от его максимального значения (форм. 4) объясняется тем, что при такой величине буксования почвенные кирпичи, зажатые между почвозацепами, полностью срезаются и образуется «земляное» колесо, т.е. трение покоя $f_{п}$ заменяется трением скольжения.

Заключение

1. При оценке тягово-сцепных и экономических свойств проектируемых колесных тракторов с помощью теоретических тяговых характеристик важное значение имеет правильный выбор функции $\delta = f(\varphi_{кр})$.

2. Приведенные зависимости $\varphi_{кр} = f(\delta)$ – 6 и 7 с одной стороны при адекватном описании процесса буксования имеют недостаточный набор коэффициентов, отражающих физико-механические свойства грунтовой поверхности (формула 5), с другой стороны расчет по формуле 6 при конечных значениях δ величины буксования (т.е. при $\delta = 0$ и при $\delta = 1$) дает неверные значения.

3. Наиболее полно отражает реальный процесс буксования формула 7, которую следует применять при построении теоретических характеристик проектируемых колесных тракторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многоцелевые гусеничные и колесные машины. Теория – Минск: Новое знание; М.: ИНФА-М, 2012. – 543 с.
2. Колобов, Г.Г. Тяговые характеристики тракторов / Г.Г. Колобов, А.П. Парфенов. – М.: Машиностроение, 1972. – 151 с.
3. Гуськов, А.В. Оптимизация потребительских свойств и параметров колесных тракторов семейства «Беларус»: монография / А.В. Гуськов; под ред. В.П. Бойкова. – Могилев.: Белорус.-Рос. ун-т, 2008 – 210 с.

УДК 621.7/9.048.7

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 28.01.2014

Триботехнические характеристики многоэлементных, многокомпонентных PVD и металлосодержащих DLC покрытий

Г.Я. Беляев, канд. техн. наук, профессор, С.Ю. Котов, аспирант (БНТУ)

Аннотация

С целью изучения возможности использования вакуумных покрытий в узлах трения были исследованы основные триботехнические характеристики DLC и PVD покрытий, полученных вакуумно-плазменным методом, на основе титана, циркония, хрома и алюминия при трении скольжения в паре со сталью ШХ15 ГОСТ 801-78. В ходе исследования были выявлены покрытия с оптимальным сочетанием свойств, таких как коэффициент трения скольжения, износостойкость, время приработки и изнашивающая способность по отношению к контртелу.

The basic tribological characteristics of DLC and PVD coatings received from a vacuum-plasma method based on titanium, zirconium, chromium and aluminum sliding friction in pair with steel SH15 GOST 801-78 were investigated in order to study the possibility of using a vacuum coating in friction. The study revealed the coating with an optimum combination of properties such as coefficient of friction, wear and running, and wear ability in relation to counterbody.

Введение

Одной из главных причин, тормозящих развитие и повышение рентабельности сельского хозяйства Республики Беларусь в настоящее время, на наш взгляд, является недостаточная эффективность сельскохозяй-

ственной техники, которая зависит, главным образом, от ее надежности – способности выполнять заданные функции с минимальными затратами труда и материальных средств в течение длительного времени.

Ежегодно из-за неисправностей и износа простаивает значительная доля машин и оборудования. Не-

достаточное количество техники, пригодной к эксплуатации, ведет к затягиванию уборочной кампании и, как следствие, потере стратегически важного сырья.

Решение данной проблемы видится в увеличении работоспособности и ресурса сельскохозяйственных машин, которые в значительной степени определяются интенсивностью изнашивания трущихся деталей. Опыт эксплуатации свидетельствует, что 80-90 % деталей сельскохозяйственных машин выходят из строя по причине износа.

Оптимизация выбора покрытий узлов трения мобильных сельскохозяйственных машин представляет наиболее перспективный и экономичный путь повышения их работоспособности. Одним из самых перспективных методов повышения долговечности узлов трения мобильной сельскохозяйственной техники является применение вакуумно-плазменных покрытий.

Отличительными особенностями данной группы методов являются:

- высокое качество покрытий (химическая чистота, адгезия, твердость и т.д.);
- оптимальное сочетание стоимости и эффективности;
- экологическая безопасность и др. [1].

В последние годы на рынке отмечается устойчивая тенденция к росту предложения многокомпонентных и многоэлементных покрытий, которые по заявленным характеристикам, обладают уникальным сочетанием свойств. Однако до настоящего времени не выявлены основные триботехнические характеристики и экономическая целесообразность их применения.

Целью данного научного исследования стало определение триботехнических характеристик новейших многоэлементных, многокомпонентных и металлосодержащих алмазоподобных покрытий.

Основная часть

Методы и материалы исследований

Испытания на определение коэффициента трения скольжения покоя пары трения «PVD покрытие – сталь ШХ15» проводились на приборе Monitor Slip & Friction Tester. Образцы представляли собой параллелепипеды из закаленной стали ШХ15 ГОСТ 801-78 (твердость 63...65 HRC), с размером граней 25x25x10 мм, на поверхность которых наносилось PVD-покрытие толщиной 5 мкм методом магнетронного распыления.

Для определения коэффициента трения скольжения со смазочным материалом и без него использовались образцы из закаленной стали ШХ15, которые представляли собой цилиндрическое тело диаметром 60 мм и высотой 10 мм, на торцовую поверхность которого были нанесены покрытия толщиной 5 мкм. Определение коэффициента трения скольжения характеристик вакуумно-плазменных покрытий и износа проводилось в соответствии с ГОСТ 23.224-86 на универсальной машине трения УМТ 2168 с электро-механическим измерителем момента сопротивления вращению (момента трения). В качестве контртела использовались термообработанные шарики из стали

ШХ15 (65 HRC) номинальным диаметром 11,509 мм. Шероховатость всех поверхностей трения составляла $Ra=0,4$ мкм. Условия контакта: трение скольжения по схеме «палец-диск».

При определении коэффициента трения скольжения без смазки в целях недопущения задиров и улучшения условий приработки пар трения осуществляли однократно смазку пластичной смазкой Литол-24 «ЛЮКС» ГОСТ 21150-87. После проведения первого замера изменения массы образца, по истечении 30 секунд от начала испытания, смазочный материал удалялся и далее не применялся.

При определении коэффициента трения скольжения со смазкой изучение производилось при погружении пары трения в масло И40А ГОСТ 20799-88.

Испытания проводили при частоте вращения пальца $n=300$ мин⁻¹ при постоянной влажности и температуре окружающей среды.

В ходе эксперимента регистрировались величины массового износа образцов покрытий на аналитических весах HR-200 (с точностью измерения до 0,0001 г) по истечении 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50 минут от начала эксперимента и контртела в конце эксперимента, а также значения момента трения с частотой два измерения в секунду.

Коэффициент трения рассчитывали по формуле

$$\mu = \frac{2M_{TP}}{D \cdot F}, \quad (1)$$

где M_{TP} – момент трения, Н·м;

D – диаметр образца, м; $D = 0,02$ м;

F – нагрузка, Н; при трении без смазки $F = 200$ Н,

при трении со смазкой $F = 1000$ Н.

За величину коэффициента трения принимали его значение в установившемся режиме при испытаниях каждого образца вакуумно-плазменного напыления. Для каждого покрытия исследования проводились пятикратно.

Величину износа предложено оценивать удельным объемным износом, как объем покрытия, подвергнутого износу при трении скольжения без смазки под нагрузкой на определенном пути трения по формуле

$$K_{II} = \frac{V}{L \cdot F}, \quad (2)$$

где V – объем металла, удаленного в процессе износа, м³;

F – нагрузка, Н; $F = 200$ Н.

L – путь трения, м; $L = \pi D n t$,

где D – средний диаметр кольца изнашивания, м;

n – частота вращения пальца, мин⁻¹; при трении без смазки $n=300$ мин⁻¹;

t – время трения, мин;

В результате трения на образцах образовывалась канавка износа, имеющая форму кольца. Геометрические параметры канавки износа по сечению, перпендикулярному к поверхности трения, имели постоянное значение, что позволило вычислить объем материала покрытия, удаленного в результате износа. Объем удаленного материала определяли умножением

ем высоты бороздки, образовавшейся в ходе эксперимента, на ее площадь. Высоту кольца износа определяли при помощи контактного профилографа-профилометра мод. 252 ГОСТ 19300-86. Площадь контакта приняли равной площади торца контртела, имеющего кольцевидную форму.

Изнашивающую способность покрытия по отношению к контртелу определяли как отношение изменения массы пальца к пути трения.

Результаты измерения коэффициента трения покоя для различных PVD-покрытий представлены на рис. 1.

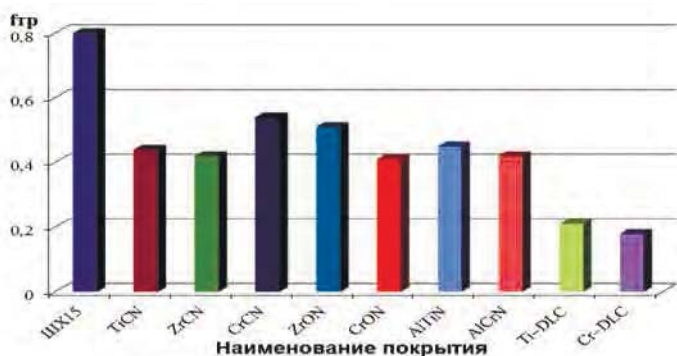


Рисунок 1. Коэффициент трения покоя пары трения «PVD-покрытие – сталь ШХ15»

Как следует из результатов эксперимента, все изученные PVD-покрытия уменьшают величину коэффициента трения скольжения покоя. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что на силу трения скольжения в состоянии покоя помимо механического взаимодействия между телами трения, существенное влияние оказывает межмолекулярное взаимодействие поверхностей, которое значительно увеличивает ее по сравнению с другими видами трения.

Также было установлено, что наименьшим коэффициентом трения покоя обладают алмазоподобные металлосодержащие углеродные покрытия.

График изменения коэффициента трения скольжения имел характерную форму для всех покрытий.

График изменения коэффициента трения скольжения во времени представлен на рис. 2.

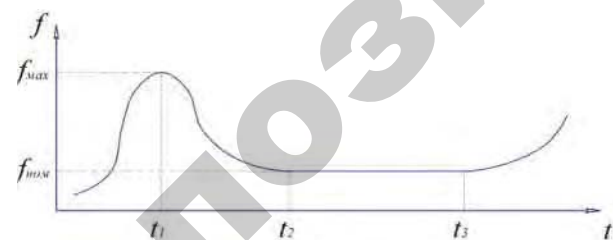


Рисунок 2. Схема изменения коэффициента трения скольжения во времени пары PVD-покрытие – сталь ШХ15 по схеме трения «палец-диск» во времени

С момента начала эксперимента происходило увеличение коэффициента трения до момента времени t_1 , когда достигалось максимальное значение f_{MAX} . После чего наблюдалось постепенное снижение его значения до величины, которая оставалась практически неизмен-

ной длительное время и составляла $0.4-0.6 f_{MAX}$. В период работы покрытия на отрезке времени t_2-t_3 наблюдался постоянный коэффициент трения скольжения, значение которого принимали за номинальное. По истечении определенного периода (после t_3), наблюдалось увеличение значения коэффициента трения скольжения до момента разрушения покрытия.

Факт изменения коэффициента трения скольжения на начальном периоде работы можно объяснить приведением шероховатости поверхностей к оптимальному значению: в процессе приработки происходит постепенный износ (истирание) неровностей, полученных при механической обработке, с последующим образованием нового микрорельефа поверхностей трения. Данный процесс протекает в условиях повышения температуры и разрушения оксидных пленок с образованием продуктов износа, наблюдавшихся в зоне трения в определенном количестве.

Рост коэффициента трения скольжения на финальной стадии эксперимента можно объяснить нарушением целостности покрытия вследствие истирания. На данном этапе эксплуатации покрытия, площадь контакта трущихся поверхностей состоит из уменьшающейся суммы участков с вакуумно-плазменным покрытием и из постоянно увеличивающейся суммы площадей стали ШХ15 без покрытия. Т.к. коэффициент трения скольжения в паре трения «сталь ШХ15 – сталь ШХ15» несколько выше, чем в паре трения «PVD-покрытие – сталь ШХ15», происходит изменение параметров процесса трения, результатом которых и стало увеличение момента трения, которое мы и наблюдали.

Коэффициенты трения скольжения без смазки для различных PVD-покрытий представлены на рис. 3.

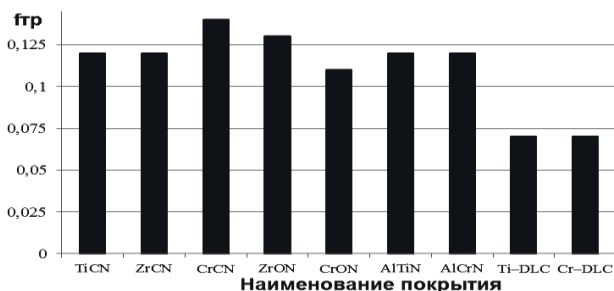


Рисунок 3. Коэффициент трения скольжения без смазки пары трения «PVD-покрытие – сталь ШХ15»

В ходе эксперимента также было установлено, что время приработки пары трения «PVD-покрытие – сталь ШХ15» существенно отличается для каждого покрытия. Т.к. приработка характеризуется повышенным износом поверхностей трения, возрастанием температуры в зоне трения и образованием эксплуатационной шероховатости, которая отличается от технологической, триботехнические покрытия должны обладать наименьшим временем приработки.[2-5].

Значения времени приработки для PVD-покрытий представлены на рис. 4.

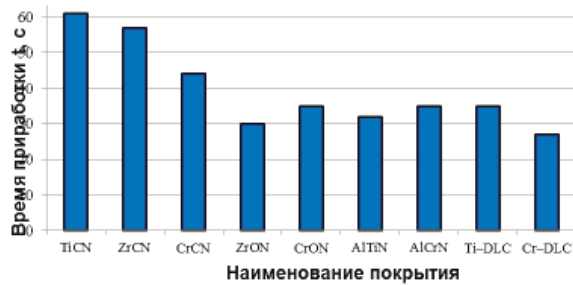


Рисунок 4. Время приработки при трении скольжения без смазки в паре трения «PVD-покрытие – сталь ШХ15»

Исходя из результатов исследования, можно предположить, что время приработки вакуумно-плазменных покрытий находится в некоторой зависимости от их микротвердости. Наименьшее время приработки показали покрытия *ZrON*, *AlTiN* и *Cr-DLC* покрытия.

Результаты исследования износостойкости покрытий показали положительное влияние всех вакуумно-плазменных покрытий на износостойкость образцов (рис. 5).

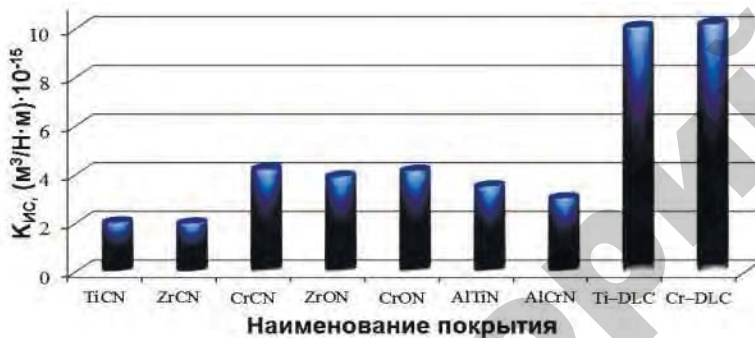


Рисунок 5. Объемный коэффициент износа PVD-покрытий при трении в паре со сталью ШХ15

Анализ результатов исследования показывает, что наименьшее значение объемного износа показали карбонитриды титана и циркония, а также *DLC*-покрытия. Эффективность этих покрытий, по всей видимости, обусловлена электронным строением слоев.

Согласно работе [6], возникновение адгезионного взаимодействия между поверхностями трения возможно при условии образования общих связей за счет электронного обмена, приводящих к уменьшению общей энергии системы. Это является следствием увеличения локализации элементов в стабильные конфигурации и повышения доли конфигураций промежуточного спектра.

Повышение степени локализации электронов и увеличение доли стабильных конфигураций облегчается при наличии в зоне конфигураций высоких давлений. При этом доля стабильных конфигураций, образованных атомами контактирующих поверхностей, может

быть больше первоначальной одного или обоих контактирующих металлов.

В первом случае будет наблюдаться износ и перенос металла с меньшей долей локализованных электронов на поверхность металла с большим их числом, во втором – взаимный перенос с обеих поверхностей. Следует также учитывать энергетическую устойчивость конфигураций, например, в случае если локализованные электроны одного из контактирующих металлов преимущественно *d10*-, а второго *d5*-конфигураций, то в этом случае будет происходить износ первого металла с его переносом на второй, хотя число локализованных электронов у *d5* больше.

Весьма важной при оценке триботехнических характеристик покрытия, по мнению авторов, является изнашивающая способность покрытий по отношению к контртелу. Несмотря на то, что исследованию этой характеристики уделяется недостаточное внимание, износ контртела, наравне с износом упрочняемого тела, оказывает существенное влияние на долговечность, вибрационную и шумовую активность узлов трения. [7-8].

По окончании эксперимента регистрировалась величина массового износа контртела (пальца), оцениваемая как изнашивающая способность PVD-покрытий по отношению к контртелу.

Наименьшую изнашивающую способность по отношению к контртелу показали *DLC*-покрытия и вакуумные покрытия *AlCrN* и *AlTiN*, а наибольшее значение этого показателя продемонстрировали карбонитриды титана и циркония, что можно объяснить высокой микротвердостью покрытий, продукты износа которого, присутствуя в зоне трения, приводят к выраженному абразивному действию.

Коэффициенты трения скольжения в среде жидкой смазки для различных PVD-покрытий представлены на рисунке 6.

Выводы

1. Наилучшим сочетанием свойств, таких как коэффициент трения скольжения и низкая изнашивающая способность по отношению к контртелу, при трении в паре со сталью ШХ15 обладают металлосодержащие алмазоподобные покрытия.

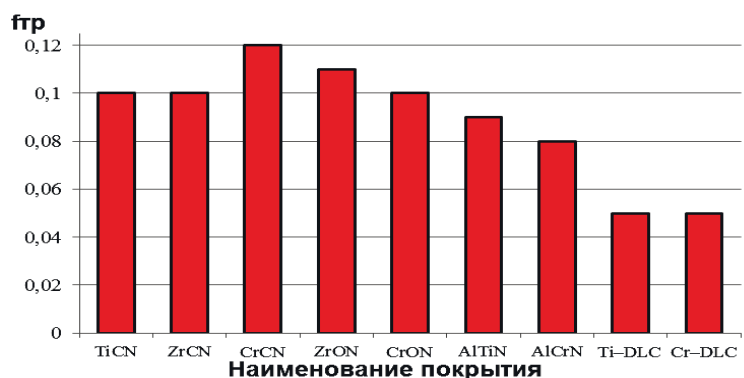


Рисунок 6. Коэффициенты трения скольжения в среде масла И40А пар трения «PVD-покрытие – сталь ШХ15»

2. Покрытие $ZrCN$ наряду с высокой износостойкостью и пониженным коэффициентом трения, показало среднюю изнашивающую способность по отношению к контртелу, что позволяет рекомендовать использование данного покрытия для улучшения характеристик узлов трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толлок, В.К. Разработка и внедрение новых методов плазменной технологии высоких энергий / В.К. Толлок, В.Г. Падалка // Вестник АН УССР, 1979. – № 4. – С. 40-49.

2. Котов, С.Ю. Триботехнические характеристики одноэлементных PVD покрытий / С.Ю. Котов, Г.Я. Беляев // Трение и износ, 2013. – Т. 34. – №4. – С. 281-285.

3. Triboengineering characteristics of unicomponent PVD coatings [Электронный ресурс] / Сайт научных онлайн-публикаций LinkSpringer. – Лондон, 2009. – Режим доступа: <http://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068366613040065>. – Дата доступа: 30.08.2014.

4. Дудник, С.Ф. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве / С.Ф. Дудник, А.В. Сагалович, А.П. Любченко, А.К. Олейник // Физическая инженерия поверхности, 2004. – № 1. – С. 110-114.

5. Богданович, И.И. Исследование триботехниче-

ских характеристик PVD-покрытий / Богданович И.И., С.Ю. Котов, Г.Я. Беляев // Образование и наука в XXI веке: материалы междунар. науч.-техн. конф., София, 1–2 ноября 2013 г. / «Бял ГРАД-БГ». – София, 2013. – С. 47–52.

6. Влияние износостойкости покрытий на контактное взаимодействие режущих инструментов с обрабатываемым материалом: сб. научн. трудов / В.М. Мацевитый [и др.] //– Физика износостойкости поверхности металлов: – Ленинград: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1989. – С. 201–205.

7. Котов, С.Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения тел качения покрытием ZrN на уровень виброскорости подшипников / С.Ю. Котов, Г.Я. Беляев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, Могилев, 30–31 октября 2014 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2013. – С. 42-45.

8. Котов, С.Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения тел качения покрытием ZrN на уровень шума подшипников / С.Ю. Котов, Г.Я. Беляев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, Могилев, 30-31 октября 2014 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2013. – С. 46-49.

Измерители-регуляторы МТ2

Предназначены для измерения и регулирования температуры (в комплекте с датчиками температуры), а также других неэлектрических величин (давление, уровень, влажность и т.д.)



Измерители-регуляторы МТ2 являются универсальными цифровыми программируемыми микропроцессорными устройствами. Они могут быть использованы при создании систем автоматического контроля и регулирования различных параметров технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве.

Основные технические данные

Напряжение питания	230 В ± 10%, 50 Гц
Потребляемая мощность, не более	4 ВА
Масса, не более	0,4 кг
Габаритные размеры	120x96x48 мм
Входной сигнал (измерительный преобразователь)	Термопреобразователь сопротивления: ТСП50П, ТСП100П, ТСМ50М, ТСМ100М; Термопара типа: «L», «J», «K»; Унифицированный токовый сигнал: 0...5мА, 0...20мА, 4...20мА
Предел основной приведенной погрешности измерения	±0,5 %
Закон регулирования	позиционный, ПИД