

О применении пиролитических карбидохромовых покрытий в узлах трения машин

* В. А. Васин^а, Б. Л. Крит^а, В. А. Невровский^а, ** О. В. Сомов^б, Н. В. Морозова^с

^аФГБОУ ВПО «МАИ – Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», Волоколамское шоссе, 4, г. Москва, 125993, Россия, * e-mail: sanches0@mail.ru

^бФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия, ** e-mail: ovsomov@mail.ru

^сГБОУ ДПО «Российская медицинская академия последипломного образования» (РМАПО), ул. Баррикадная, д. 2/1, г. Москва, 123995, Россия, e-mail: innat.m@mail.ru

Представлены трибологические исследования перспективных пиролитических карбидохромовых покрытий для повышения износостойкости поверхности тяжело нагруженных узлов транспортных средств. Получены значения коэффициентов трения стандартного металлокерамического фрикционного материала МК-5 о сталь 65Г и сталь 40Х с карбидохромовым покрытием в диапазоне скоростей 2–6 м/с. Исследования проводили в среде масла, применяемого в гидравлических коробках передач тракторов. Сопоставление результатов измерений трения и износа стальных дисков с покрытием ПКХП и без него указывают на преимущество использования данного покрытия: покрытая сталь 40Х с шероховатостью поверхности $R_a \sim 1,8 - 2,0$ мкм показала снижение износа до двух порядков по сравнению с диском из стали 65Г без покрытия. Испытания полноразмерных дисков в гидромеханической коробке передач при реальных режимах буксования показали, что применение дисков с пиролитическим карбидохромовым покрытием может увеличить срок службы не менее чем в два раза.

Ключевые слова: пиролитические покрытия, карбид хрома, трение, износ, фрикционные пары.

УДК 621.793.164

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пиролитические карбидохромовые покрытия (ПКХП) широко применяются в различных областях техники ввиду присутствия им высокой износостойкости и устойчивости к агрессивным средам [1, 2]. Кроме защиты деталей и целых конструкций в нефтехимической, авиационной и других отраслях промышленности от коррозии и истирания, покрытия успешно используются в станкостроении для упрочнения и модификации свойств поверхности инструментов. Известно, например, что к такому покрытию не прилипает горячая резина при штамповке из нее изделий различного назначения. Оказалось также, что благодаря присутствию в покрытии чистого хрома и карбида хрома электроды для контактной сварки не склонны к «примерзанию» к свариваемому материалу и поэтому имеют повышенный срок службы. Особенно это ценно при автоматической сварке оцинкованного стального листа [3, 4]. Представляет интерес вопрос о перспективах использования таких покрытий в узлах трения. Широко распространенными узлами трения в машинах являются гидромеханические коробки передач (ГМКП). В данной работе приведены результаты изучения технической возможности применения дисков с ПКХП в гидромеханической коробке передач трактора. Для этого были изучены трибологические свойства ПКХП в условиях, частично моделирующих работу фрикционных узлов ГМКП. Проведенные ускоренные натур-

ные испытания ГМКП с дисками с покрытием показали также их повышенную работоспособность по сравнению с серийно выпускаемыми.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В конструкции фрикционных узлов серийно выпускаемой ГМКП трактора парой трения являются диск из стали 65Г и стальной диск с накладками из металлокерамики МК-5. Диски в коробке передач испытывают нагрузки в момент буксования транспортного средства. При буксовании диски в парах трения работают в условиях циклического повторно-кратковременного относительного вращения [5]. Это значит, что скорость одного диска пары относительно другого за короткое время возрастает до максимального значения, а потом быстро падает. Воспроизвести такой режим нагрузок в модельном эксперименте невозможно. Диски в коробке передач постоянно сомкнуты с усилием и в момент переключения передачи или наезда трактора на препятствие (нож, плуг и пр.) происходит пробуксовка дисков. Поэтому в данном эксперименте изучались трибологические характеристики материалов, используемых в ГМКП, в условиях, наиболее близких к натурным. Для этого использовались образцы пар трения, которые испытывались на машине трения. Так как характер работы пар трения в этом случае сильно отличается от режимов буксования, были проведены только сравнительные эксперименты по определению

работоспособности дисков с карбидохромовым покрытием и штатных дисков из стали 65Г в одинаковых условиях их нагружения на машине трения.

Параметрами, определяющими режим работы дисков в паре трения, являются удельное прижатие дисков и скорость их относительного движения.

По условиям работы фрикционной пары в ГМКП удельное прижатие $18\text{--}22,5 \text{ кг/см}^2$, относительная линейная скорость при буксовании кратковременно достигает $\sim 40 \text{ м/с}$. Удельное прижатие в модельном эксперименте было воспроизведено в машине трения СМТ-1 [6], а относительная скорость движения образцов по техническим причинам была ограничена (не более 6 м/с). По литературным данным, коэффициент трения в парах сталь и спеченный фрикционный материал на медной основе, которые работают в масле (а это как раз и есть моделируемый случай), составляет от $0,08$ до $0,12$ [5]. Коэффициент трения подлежит экспериментальному определению наряду с оценкой износа материала диска.

Реальные диски имеют неприемлемо большие габариты (в диаметре $\sim 460 \text{ мм}$) для проведения испытаний в условиях, наиболее близких к натурным. Поэтому на машине трения испытывались образцы, моделирующие в уменьшенном масштабе диски ГМКП. Образцы показаны на рис. 1. Наружный диаметр образцов – 50 мм .

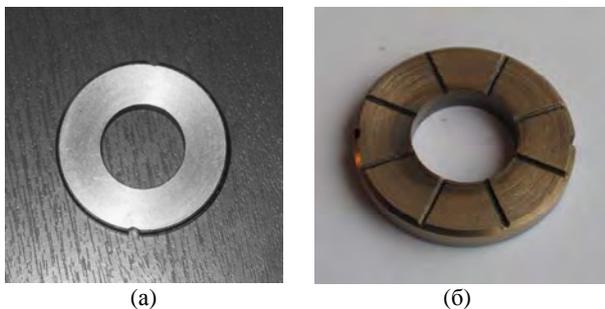


Рис. 1. Внешний вид образцов: (а) – образец с ПКХП; (б) – образец с накладками из медного композита МК-5.

Одним из способов повышения надежности и ресурса фрикционных дисков трения ГМКП является такая модификация рабочей поверхности стального диска без накладок, которая приводит к уменьшению износа и увеличению твердости поверхности. В данной работе модификация заключалась в нанесении на образцы из стали 40Х продуктов термического разложения хроморганической жидкости «Бархос» [2,7].

Предварительные эксперименты показали, что для достижения максимального качества пиролитического карбидохромового покрытия на рабочей поверхности дисков трения (микротвердость $(1,3\text{--}1,5) \cdot 10^4 \text{ МПа}$, разнотолщинность покрытия не более $5\text{--}7\%$, прочность на сжатие

$350\text{--}400 \text{ МПа}$) следует соблюдать следующие условия:

- предварительная подготовка поверхности: вакуумный отжиг при температуре 550°C и остаточном давлении $0,1 \text{ Па}$ в течение 8 часов; травление в $36\% \text{ HCl}$ в течение 1 часа; удаление шлама моющим средством на основе окиси магния;

- использование добавки в ХОЖ «Бархос» бензилового эфира в количестве 3% от ее массы;

- температура подложки $500\text{--}520^\circ\text{C}$, давление в камере $0,1\text{--}1,0 \text{ Па}$, температура испарителя $200\text{--}240^\circ\text{C}$, скорость откачки – 700 л/с , скорость подачи ХОЖ «Бархос» – 1 кг/час , продолжительность процесса нанесения – $3,5 \text{ часа}$.

Покрытие имеет однородный фазовый состав, в котором содержится 70% массовых Cr_7C_3 и $30\% \text{ Cr}_3\text{C}_2$. Практически отсутствуют поры. Прочность сцепления с подложкой – $14,67 \text{ МПа}$.

От нанесения ПКХП на сталь 65Г в модельных экспериментах отказались по двум причинам: во-первых, технология нанесения покрытия была лучше отработана для стали 40Х [7], во-вторых, в паре трения работает непосредственно покрытие, а материал подложки влияет на работу косвенно. Например, материал подложки может влиять на интенсивность отвода тепла из зоны трения, что существенно в условиях сухого трения. Однако трение дисков в ГМКП происходит в масле, и в этом отношении неравенство теплопроводностей стали 65Г и стали 40Х практически не должно проявляться.

По этой же технологии было нанесено ПКХП на полноразмерные диски трения из стали 40Х, которые в дальнейшем испытывались в гидромеханической коробке передач трактора по программе ускоренных испытаний в ОАО «НПП Полигон – МТ».

Для выявления влияния шероховатости на фрикционные свойства покрытий из карбида хрома в паре с композитом МК-5 стальные образцы изготавливались с разной шероховатостью рабочей поверхности. Поверхности были обработаны точением и шлифованием. Снятие параметров до нанесения покрытия показало, что поверхность после точения имеет шероховатость $R_a = 1,89 \text{ мкм}$, а после шлифования – $R_a = 0,41 \text{ мкм}$.

Для трибологических испытаний покрытий по схеме «диск-диск» использовали модернизированную машину трения СМТ-1 (рис. 2) [6].

Образец из испытуемого материала (сталь 65Г или сталь 40Х с ПКХП) устанавливается в обойме 1 и вращается с заданной скоростью с помощью системы электропривода 4. Неподвижный образец из фрикционного материала МК-5 устанавливается в силоизмерительное устройство 2.

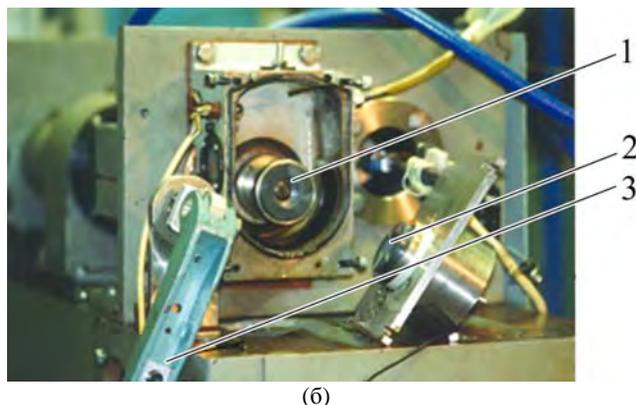
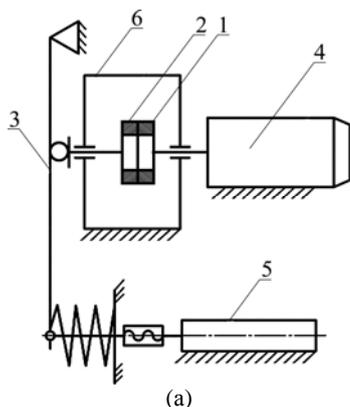


Рис. 2. Модернизированная машина трения СМТ-1: (а) – схема испытаний; (б) – внешний вид испытательной камеры. 1 – обойма с подвижным образцом; 2 – силоизмерительное устройство с неподвижным образцом; 3 – прижимной рычаг; 4 – электропривод; 5 – двигатель; 6 – картер.

Образцы прижимаются друг к другу в картере 6, заполняемом маслом. Нагрузку на образцы обеспечивают с помощью рычага 3 и двигателя 5 с шариковинтовой парой. Испытания образцов на трение и износ проводились в гидравлическом масле для гидромеханических передач марки А (ТУ 0253-015-70351853-2009).

При испытаниях регистрируются следующие характеристики: скорость скольжения, коэффициент трения, нагрузка, температура масла.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с программой проводили измерения коэффициента трения при постоянном давлении образцов $P = 2$ МПа. Для выявления зависимости коэффициента трения от скорости скольжения линейная скорость менялась ступенчато с шагом $\Delta v = 1$ м/с от 2 м/с до максимальной величины $v_{\max} = 6$ м/с, с продолжительностью испытаний на каждой ступени 14–16 мин. На рис. 3 и 4 представлены зависимости измеренного коэффициента трения фрикционных пар от скорости.

При увеличении скорости скольжения коэффициент трения сохраняет достаточно стабильное значение. При этом его среднее значение практически одинаково для всех пар трения (порядка 0,04). В паре трения сталь 65Г–МК-5 такой же характер изменения коэффициента трения наблюдается и при снижении скорости скольжения. Однако при этом наблюдается резкое увеличение коэффициента трения в парах трения с образцами из стали 40Х с ПКХП. Значение коэффициента трения возрастает примерно в 2 раза: с 0,028 до 0,068 в паре трения 40Х с ПКХП (шлифование) – МК-5 и с 0,035 до 0,073 в паре трения 40Х с ПКХП (точение) – МК-5. Это позволяет предположить, что в силу циклического характера работы ГМКП при снятии нагрузки на приводе и последующем торможении дисков

время пробуксовки будет сокращаться за счет увеличения коэффициента трения. В результате полное время буксования должно сократиться.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗНОС

Испытания на износ проводили при постоянной нагрузке 2 МПа, постоянной скорости скольжения 2 м/с. Длительность испытаний составляла 112 минут. Основным параметром износостойкости материала служила интенсивность изнашивания, рассчитываемая по формуле:

$$I = \frac{h}{S},$$

где S – путь трения, h – линейный износ покрытия.

Линейный износ определялся расчетным методом по измеренной потере массы диска при трении и плотности материала в предположении, что износ происходит равномерно по трущейся поверхности. Результаты измерения износа приведены в таблице.

Анализ протоколов испытаний на износ показал, что коэффициент трения и температура в картере испытательной обоймы в начальный период сохраняют стабильное значение. К 112 минуте испытаний коэффициент трения составил значение в парах трения сталь 65Г–МК-5 – 0,029, сталь 40Х с ПКХП (точение) – МК-5 – 0,034, сталь 40Х с ПКХП (шлифование) – МК-5 – 0,031, температура масла – 81, 81, 78°С соответственно. К отметке времени 102 минуты наблюдаются незначительное снижение коэффициента трения и понижение температуры масла в картере, что объясняется эффектом прирабатываемости образцов в парах трения. В результате испытаний отмечено, что происходит заметное (при величине износа, равной $2,9 \cdot 10^{-7}$ мм/мм) изнашивание образца из стали 65Г. При этом в паре трения сталь 40Х с ПКХП (точение) – МК-5 износ



Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости, снятая при увеличении скорости скольжения.

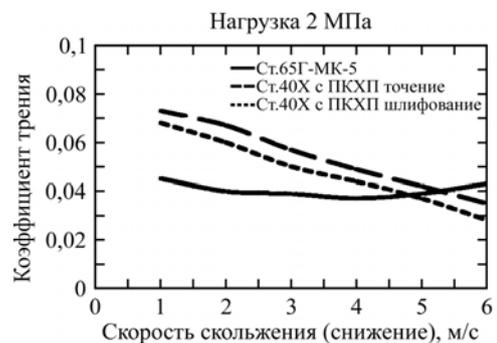


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от скорости, снятая при снижении скорости скольжения.

Таблица. Результаты испытаний дисков на износ

Пара трения	Коэффициент трения (при $t = 112$ мин)	Интенсивность изнашивания I , мм/мм
65Г–МК-5	0,029	65Г – $I = 2,9 \cdot 10^{-7}$ МК-5 (износ малозначим)
Сталь 40X с ПКХП (точение) – МК-5	0,034	Сталь 40X с ПКХП (точение) и МК-5 (износ малозначим)
Сталь 40X с ПКХП (шлифование) – МК-5	0,031	МК-5 $I = 9 \cdot 10^{-9}$

образцов малозначителен, и только в паре трения сталь 40X с ПКХП (шлифование) – МК-5 наблюдается изнашивание образца с МК-5 с интенсивностью, равной $9 \cdot 10^{-9}$ мм/мм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ввиду того что невозможно полностью смоделировать на машине трения условия работы дисков в коробке передач, в данной работе допустимо лишь сравнительное обсуждение измеренных коэффициентов и износа.

Во-первых, коэффициент трения как стали 40X, так и стали 65Г о фрикционный композит МК-5 заметно ниже, чем принято считать типичным для пар, в которых используется спеченный фрикционный материал на основе меди ($\mu = 0,08-0,12$). Возможно, это связано с тем, что испытания проводились при скорости скольжения 2–6 м/с, что на порядок ниже, чем в натуральных условиях. Для проверки этой гипотезы мы планируем использовать в последующих работах вместо МК-5 другой фрикционный материал, например на основе железа, у которого ожидаемое значение коэффициента трения 0,2–0,4 [8]. Повышение коэффициента трения позволило бы сократить время буксования, но при этом должно увеличиться выделение тепла в контактной зоне. Это может привести к неприемлемому повышению температуры в зоне контакта.

Интересно также сравнить работоспособность дисков из стали 65Г и предлагаемых на замену дисков с ПКХП при работе штатной ГМКП на тракторе. С этой целью в ОАО «НПП Полигон – МТ» были проведены ускоренные стендовые испытания штатной ГМКП с полноразмерными дисками из стали 40X с нанесенным на них

ПКХП по вышеописанной технологии. Испытания показали, что срок службы ГМКП в режиме буксования возрастает в два раза, причем отказы работы ГМКП происходили из-за выкрашивания зубьев коронных шестерен и по другим причинам, не связанным с работой пар трения. В то же время величины износа образцов из стали 65Г и стали 40X в модельных экспериментах, как видно из таблицы, отличаются более чем на порядок в пользу применения покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены значения коэффициентов трения стандартного металлокерамического фрикционного материала МК-5 о сталь 65Г и сталь 40X с карбидохромовым покрытием в диапазоне скоростей 2–6 м/с. Эти значения относятся к трению в среде масла, применяемого в гидравлических коробках передач тракторов. Хотя полностью смоделировать условия работы пар трения в ГМКП невозможно, сопоставление результатов измерений трения и износа стальных дисков с ПКХП и без него указывают на преимущества использования данного покрытия на стали 40X с шероховатостью поверхности $R_a \sim 1,8-2,0$ мкм. Выигрыш в уменьшении изнашивания модельного диска с покрытием на машине трения СТМ–1 составляет до двух порядков по сравнению с диском из стали 65Г без покрытия. В то же время испытания полноразмерных дисков в гидромеханической коробке передач при реальных режимах буксования показали, что применение дисков с пиролитическим карбидохромовым покрытием может увеличить срок службы не менее чем в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенков В.А., Крашенинников В.Н. *Эксплуатационные свойства пиролитических карбидохромовых покрытий. Применение металлоорганических соединений для получения неорганических покрытий и материалов.* М.: Наука, 1986. с. 234–243.
2. Анциферов В.Н. и др. *Плазменные, лазерные и пиролитические методы нанесения покрытий.* М.; СПб.: Реноме, 2012. 404 с.
3. Власенко А.Н., Васин В.А., Меньшиков Г.А., Невровский В.А. *Сварочное производство.* 2008, (10), 31–35.
4. Власенко А.Н., Васин В.А., Меньшиков Г.А., Невровский В.А. *Технология пиролитических карбидохромовых покрытий и точечная сварка сталей.* В книге *Теория и практика технологий производства изделий из композитных материалов и новых металлических сплавов.* М.: МАСКА, 2011. Т. 1. С. 75–81.
5. *Справочник по триботехнике.* Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний. Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1992. Т. 3. 730 с.
6. Прожега М.В., Смирнов Н.Н., Сомов О.В., Савва В.В. и др. *Трение и смазка в машинах и механизмах.* 2015, (2), 44–48.
7. Васин В.А., Невровский В.А., Сомов О.В. *Технология машиностроения.* 2007, (1), 41–44.
8. Zander C.-P. *Glaser's Annalen.* 2001, (4), 157–165.

Поступила 25.05.15

После доработки 30.10.15

Summary

Tribological aspects of the research of perspective pyrolytic chromium-carbide coatings to increase wear resistance of surfaces of heavy loaded units of vehicles are presented in the article. The values of friction coefficients of the standard ceramic-metal frictional MK-5 materials such as 65Г steel and 40X steel with chromium-carbide coating are received in the speed range from 2 to 6 m/s. A study was carried out in the environment of the oil which applies in hydraulic transmissions of tractors. A comparison of the results of the friction measurements and wear of steel disks with a coating and without it shows advantages of usage of the chromium-carbide coatings: coated 40X steel with the surface roughness $R_a \sim 1.8\text{--}2.0$ microns has a reduced wear up to two orders of magnitude in comparison with a disk of 65Г steel without a coating. Tests of full-size disks in a hydro-mechanical transmission at the real modes of slipping have shown that application of disks with pyrolytic chromium-carbide coatings can increase the service life not less than twice.

Keywords: pyrolytic coatings, chrome carbide, friction, wear, frictional couples.