

DOI: 10.53078/20778481_2023_2_44

УДК 621.793

Г. А. Костюкович, А. В. Попрукайло, А. С. Воронцов, Д. С. Калынов

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

G. A. Kostyukovich, A. V. Poprukailo, A. S. Vorontsov, D. S. Kalynov

TECHNOLOGY OF USING POLYMER COATINGS FOR SPLINE CONNECTIONS OF CARDAN GEARS

Аннотация

Представлен анализ процессов износа подвижного шлицевого соединения, проанализировано его влияние на долговечность карданной передачи. Показано, что применение технологии нанесения полимерного покрытия шлицевых соединений карданных передач обеспечивает значительное увеличение долговечности и повышение ресурса не только самой карданной передачи, но и подшипниковых узлов сопрягаемых агрегатов. Рассмотрены особенности технологии полимерных покрытий шлицевых соединений карданных передач.

Ключевые слова:

карданная передача, износ, трение, долговечность, шлицевое соединение, полимерное покрытие, технология нанесения полимерного покрытия, Полиамид 11.

Для цитирования:

Особенности технологии полимерных покрытий шлицевых соединений карданных передач / Г. А. Костюкович, А. В. Попрукайло, А. С. Воронцов, Д. С. Калынов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 44–53.

Abstract

An analysis of wear processes in a movable spline connection is presented, and their influence on the durability of the cardan drives is analyzed. It is shown that the use of polymer coating technology for spline connections of cardan gears provides a significant increase in durability and operational life not only of the cardan drive itself, but also of the bearing units of mating assemblies. The features of the technology of producing polymer coatings on spline connections of cardan gears are considered.

Keywords:

cardan gears, wear, friction, durability, spline connection, polymer coating, polymer coating technology, Polyamide 11.

For citation:

Technology of using polymer coatings for spline connections of cardan gears / G. A. Kostyukovich, A. V. Poprukailo, A. S. Vorontsov, D. S. Kalynov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 44–53.

Введение

Карданные передачи с универсальными шарнирами являются неотъемлемой частью подавляющего большинства современных машин и механизмов, особенно в транспортной тех-

нике. Оптимальный выбор конструкции карданной передачи и ее рациональная компоновка в значительной степени определяют технические и эксплуатационные характеристики машин и механизмов различного функционального назначения.

Возрастающие требования к автомобильной технике, а именно к повышению долговечности и качеству узлов транспортных средств, в частности карданных передач, требуют создания и внедрения более совершенных их конструкций.

Важной особенностью конструкции карданных передач являются осевые перемещения. Для обеспечения осевых перемещений в конструкциях карданных передач используют шлицевые соединения. Подвижное шлицевое соединение, компенсирующее изменение длины карданной передачи при его эксплуатации, является элементом, имеющим наибольшие зазоры и нагрузки, обусловленные действием крутящего момента и осевых сил, и во многом определяет долговечность карданной передачи.

Пространственные карданные механизмы, предназначенные для передачи вращательного движения между валами, имеющими угловые и осевые перемещения, отличаются многообразием конструктивных решений. Начиная с XIII в. эти механизмы, обладающие уникальными кинематическими свойствами, являются предметом изучения инженеров, ученых и математиков. В результате их совместных усилий внесен весомый вклад в разработку новых конструкций, в развитие аналитических методов проектирования и, наконец, в совершенствование технологий производства карданных механизмов.

Карданные передачи представляют сочленение одного или нескольких шарниров и трубчатых валов. Они компенсируют осевые перемещения, а также передают вращающий момент при постоянных или переменных углах между соединяемыми валами. Существует большое число модификаций карданных передач. Различия их конструкций обуславливается спецификой эксплуатации или значениями передаваемых крутящих моментов [1].

Основная часть

В процессе эксплуатации карданная передача должна удовлетворительно функционировать в период установленного срока службы, т. е. соответствовать всем требованиям, вытекающим из особенностей ее использования. Каждая конструкция карданной передачи обладает определенной продолжительностью функционирования, под которой понимают долговечность или ресурс системы. Карданная передача должна иметь такую прочность на кручение, которая обеспечивает передачу вращающего момента без риска преждевременной поломки. Подвижные шлицевые соединения или другие средства осевой компенсации должны обеспечивать заданные изменения длины. При этом необходимо, чтобы их детали имели одинаковый ресурс, а система защиты и смазки предотвращала вредное воздействие таких факторов, как вращающий момент, осевые перемещения и воздействие окружающей среды. Габариты карданной передачи должны отличаться пропорциональностью для того, чтобы свести к минимуму действие динамических сил. Кроме того, конструкция карданной передачи должна обладать равнопрочностью и иметь такие размеры, при которых обеспечивается безопасная работа при максимальной частоте вращения [1–6].

Одна из основных проблем, решаемая при создании карданной передачи, общая для всех областей техники, – это повышение надежности. Повышение надежности карданной передачи увеличивает ее эксплуатационные и межремонтные сроки, сокращает время простоя в ремонте и повышает безопасность работы. Увеличение долговечности карданной передачи равноценно увеличению их выпуска. Все это в конечном счете повышает эксплуатационные характеристики транспортного средства и уменьшает затраты на его обслуживание.

Основной причиной выхода из строя карданной передачи является износ узлов и деталей ее составляющих. Статистика показывает, что более 80 % карданных передач выходит из строя в результате износа деталей на трение: подшипников, крестовин, шлицевых соединений, деталей уплотнений. Известно, что износ находится в прямой зависимости от скоростей, нагрузок, мощностей и режимов эксплуатации. В связи с этим возникла проблема: традиционно применяемые материалы и технологии себя исчерпали. Детали пар трения, изготовленные по традиционной технологии, не отвечают требованиям надежности и долговечности. И это серьезно препятствует совершенствованию и развитию новых конструкций [1–6].

Предъявляемые в настоящее время требования к долговечности и конкурентоспособности автотракторной техники вызывают необходимость значительного увеличения долговечности входящих в нее агрегатов, в том числе и карданных передач. Элементом, определяющим срок службы карданной передачи, является шлицевое соединение. Износ шлицевого соединения приводит к нарушению центрирования шлицев, что вызывает вибрацию карданной передачи, отрицательно сказывающуюся на долговечности соединяемых агрегатов и условиях работы водителя. Поэтому применяют различные способы обработки поверхностей шлицевых соединений, чтобы уменьшить осевые усилия, а также обеспечить защиту от коррозии [1–6].

Самым распространенным из традиционных способов обработки поверхностей шлицевых соединений является фосфатирование со средней толщиной слоя 0,0025...0,0075 мм. Такие покры-

тия являются только приработочными и не дают значительного эффекта в эксплуатации [5].

В карданных передачах производства ОАО «Белкард» для снижения осевых усилий, возникающих при изменении длины карданной передачи, и для увеличения срока службы на рабочие поверхности шлицев шлицевой втулки наносится полимерное покрытие на основе Полиамида 11 (торговая марка Rilsan ES, фирма «Эльф Атокем», Франция), позволяющее снизить коэффициент трения в сопряжении. Полиамид 11 является одним из наиболее прочных термопластов, имеет хорошие антифрикционные свойства и износостойкость. Физико-механические характеристики Полиамида 11 (Rilsan ES) приведены в табл. 1.

Полиамид 11 (Rilsan ES) стоек к воздействию влаги, масел и высоких температур, вызывающих искажение формы. Покрытие устраняет шум, возникающий при работе, и служит до некоторой степени демпфером возникающих колебаний. Применение полимерного покрытия шлицевого соединения исключает периодическую смазку шлицевого соединения, проводимую примерно 2 раза в год, что уменьшает трудоемкость сезонного технического обслуживания. Кроме того, осевые усилия, воздействующие на подшипники соединяемых агрегатов, на 40 % меньше. Снижение на 40 % осевых усилий дает увеличение в 2–3 раза долговечности подшипников коробок передач и ведущих мостов.

На рис. 1 приведены графики зависимости осевого усилия в шлицевом соединении карданной передачи от величины передаваемого крутящего момента.

Табл. 1. Физико-механические характеристики Полиамида 11 (Rilsan ES)

Характеристика	Условие	Стандарт	Значение
Температура плавления		ISO 1218	(186 ± 4) °C
Точка Вика	При 1 daN	DIN 53460	181 °C
Удельный вес при 20 °C	Покрытие из обычного порошка, покрытие из Т-порошка белого цвета, покрытие из порошка ES белого цвета	ISO 1183	1,040 1,065 1,115
Водопоглощение до насыщения	При 20 °C и относительной влажности 65 % При 20 °C и относительной влажности 100 %	ISO 62/1	0,9 %...1,11 % 1,6 %...1,9 %
Твердость	По Шору По Persoz	ISO 868 ISO 1522	≈75 ≈200
Сопротивление изнашиванию	Taber (CS17, 1000 циклов, нагрузка 1 кг)	NFT 30-015	≈ (15 ± 5) мг
Прочность на удар	Ø16	ASTM G14	2... 3 Дж
Устойчивость к соленой воде	Через 2000 ч	ASTM B117	Коррозия отсутствует
Электрическая прочность диэлектрика	Толщина покрытия (обычного): 200 мкм 430 мкм	ASTM D149	52,8 кВ/мм 38,4 кВ/мм
Предел прочности на срез		ASTM D732	35...42 Н/мм

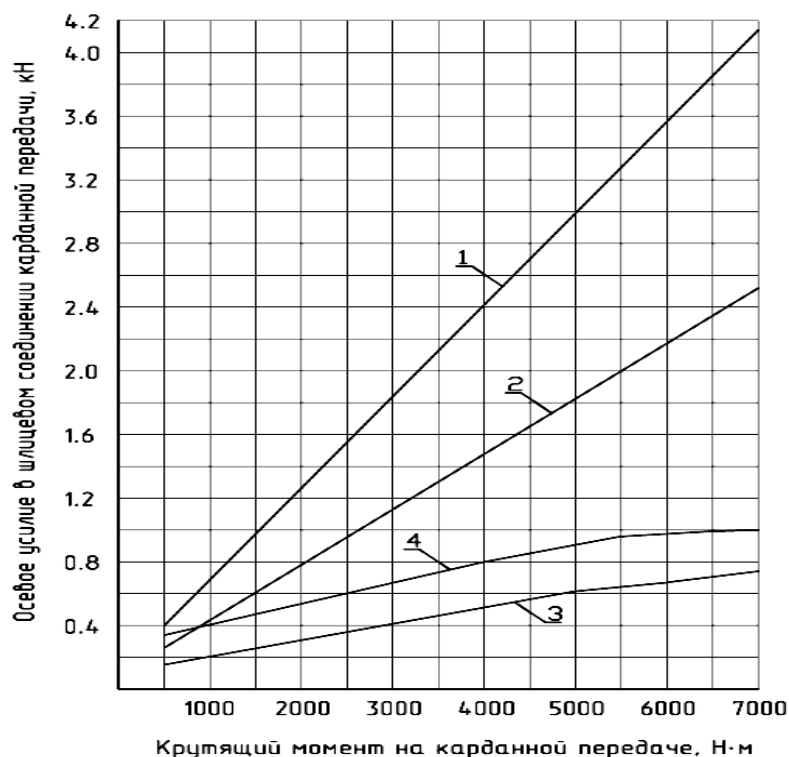


Рис. 1. График зависимости осевого усилия в шлицевом соединении карданной передачи от величины передаваемого крутящего момента: 1 – шлицевое соединение с углом профиля 15°, шлицы фрезерованные; 2 – шлицевое соединение с углом профиля 30°, шлицы накатанные; 3 – шлицевое соединение с углом профиля 30°, шлицы накатанные с полимерным покрытием; 4 – шлицевое соединение с углом профиля 30°, шлицы накатанные с полимерным покрытием, после дорожных испытаний, пробег 400000 км в условиях первой категории эксплуатации

Долговечность шлицевых соединений с полимерным покрытием Полиамид 11, с жидкостным азотированием, с антизадириным покрытием (фосфатирование) и без покрытия соответственно оценивается соотношением 100 %–50 %–20 %–10 %. Также следует отметить, что применение полимерного покрытия значительно повышает долговечность уплотнений шлицевого соединения за счет одновременного нанесения покрытия на наружную поверхность шлицевой втулки. Схема применения

уплотнения, работающего по покрытой полимером шлицевой втулке, приведена на рис. 2.

Технология нанесения полимерного покрытия отработана и внедрена в ОАО «Белкард». Технологический процесс нанесения полимерного покрытия в псевдооживленном (кипящем) слое состоит из следующих операций: предварительная подготовка поверхностей шлицевой втулки, грунтовка, предварительный нагрев, погружение в псевдооживленный слой полимера (рис. 3).

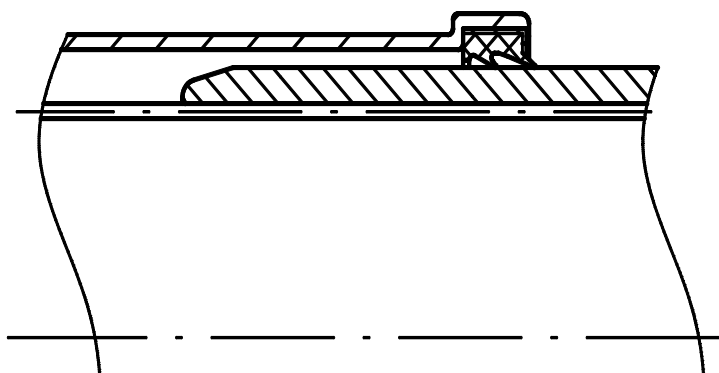


Рис. 2. Уплотнение подвижного шлицевого соединения

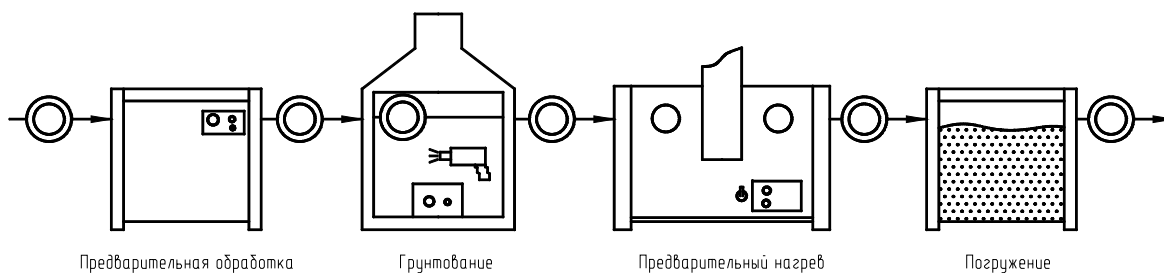


Рис. 3. Технологический процесс нанесения полимерного покрытия

Предварительная подготовка поверхностей шлицевой втулки заключается в многоступенчатом процессе очистки, включающей в себя горячую промывку, химическое обезжиривание, одну или несколько промывок и сушку.

Грунтование осуществляется распылением или окунаем детали в раствор грунтовочного средства (праймера)

на водной основе. Грунтовочный слой создает химическую связь, обеспечивающую прочную адгезию между подложкой и покрытием. Он также обеспечивает надежную защиту изделия от коррозии в случае повреждения покрытия. Основные характеристики праймера на основе эпокси-акрилата представлены в табл. 2.

Табл. 2. Основные характеристики праймера

Характеристика	Значение
Сухой остаток после испарения растворителя (30 мин при 200 °С)	21 %...25 %
Точка вспышки (стандарт DIN 53213)	(51 ± 1) °С
Удельное электрическое сопротивление	250...300 кОм
Толщина сухой пленки	8...12 мкм
Продолжительность сушки при 20 °С	10...15 мин
Средство для очистки	Горячая вода (около 50 °С)
Стойкость к истиранию (абразивный круг CS 17 / нагрузка 1 кг / 1000 об)	5
Вязкость AFNOR: n°2,5 при 25 °С n°4 при 25 °С	122...160 с 25...45 с

Предварительный нагрев является важным этапом нанесения покрытия. Для любой детали существует минимальная температура, ниже которой невозможно получить покрытие с гладкой поверхностью. Существует также максимальная температура, выше которой может произойти разрушение покрытия и/или грунтовки. Поскольку детали обычно имеют различную толщину, важно отрегулировать время предварительного нагрева, а также температуру. Температура и время предварительного нагрева определяются соответственно минимальной и максимальной толщиной детали, подлежащей покрытию. Большая разница по толщине металла может затруднить нанесение покрытия на деталь методом окунания. Температура детали по всей поверхности должна быть как можно более равномерной, около 280 °С...300 °С во время погружения для массивных деталей.

При проведении процесса нанесения покрытия в псевдооживленном (кипящем) слое загрунтованную шлицевую втулку предварительно нагревают в течение определенного периода времени, продолжительность которого зависит от формы и массы детали, до температуры, превышающей температуру плавления полимера.

Температура в печи составляет от 300 °С до 420 °С. Затем нагретую деталь погружают в псевдооживленный (кипящий) слой порошка, который перемещается или флюидизируется струей воздуха со средним напором, проходящей сквозь пористую мембрану на дне установки.

Суспендированный порошок ведет себя так же, как жидкость, поэтому частички порошка распределяются по всей поверхности детали, достигая самых труднодоступных мест. Соприкасаясь с нагретой поверхностью, они плавятся, образуя равномерный слой толщиной 250 мкм или более. Время погружения обычно составляет от 4 до 8 с, но его можно увеличить, если требуется получить более высокую толщину покрытия. Таким образом можно наносить покрытия на объемные детали достаточно сложной формы (внутреннее и внешнее покрытие за одну операцию).

Преимущества метода нанесения покрытия в псевдооживленном (кипящем) слое:

- покрытие деталей сложной формы имеет равномерную толщину;
- наружные и внутренние покрытия наносятся за одну операцию;
- высокая гибкость технологии с точки зрения размеров детали;

- не требуется последующее от-
верждение;
- высокая производительность;
- низкие потери порошка;
- простота технологии.

Сравнительные испытания шлице-
вых соединений на долговечность (без
покрытия и с полимерным покрытием)
проводились на специальном стенде
СИ 7890–4060 (рис. 4).

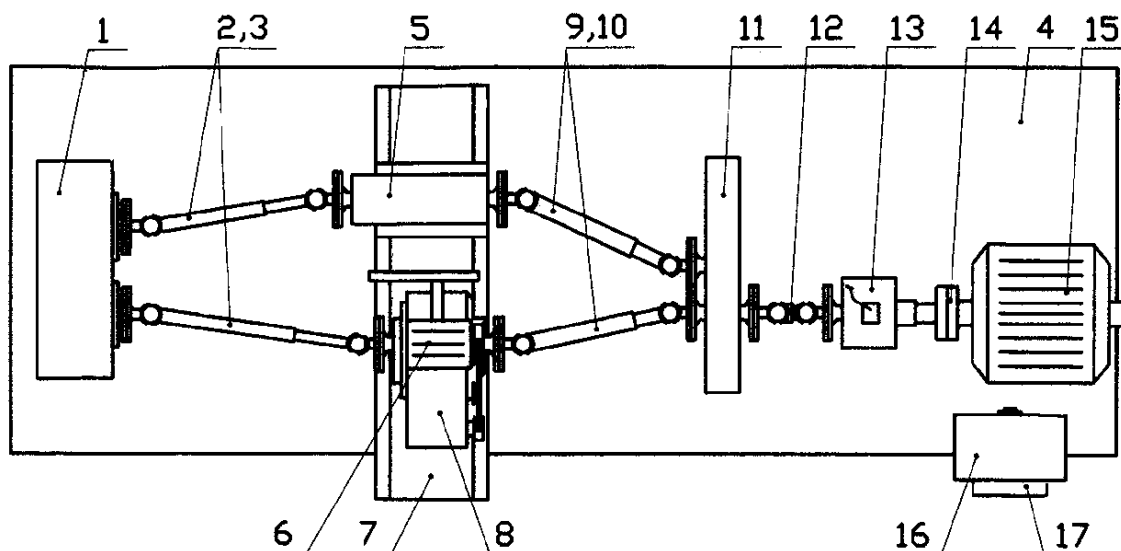


Рис. 4. Схема стенда СИ 7890–4060 для испытаний карданных валов на долговечность: 1 – редуктор двухвальный; 2, 3 – испытуемые образцы; 4 – фундаментная плита; 5 – нагрузитель; 6 – электродвигатель эксцентрикового редуктора; 7 – плита; 8 – эксцентриковый редуктор; 9, 10 – технологические валы; 11 – трехвальный редуктор; 12 – технологический вал; 13 – КПП; 14 – пальчиковая муфта; 15 – электродвигатель; 16 – электрошкаф; 17 – пульт управления

Для проведения испытаний были изготовлены три образца карданных пе-
редач одного типоразмера со шлицевым
соединением с полимерным покрытием.

Нагрузочный режим стендовых
испытаний выбран на основе экспери-
ментальных замеров нагрузочного ре-
жима в эксплуатации автомобиля:

- величина нагружающего крутя-
щего момента составляла 1500 Н·м, что
соответствует эквивалентному моменту
на карданной передаче автопоезда пол-
ной массой 44 т при движении по хол-
мистой местности;

- величина перемещения шлице-
вой вилки – 6 мм;

- частота перемещений – 1,7 с⁻¹
(четвертая передача в коробке перемены
передат);

- периодичность нагружения –
22 перемещения в течение 13 с под на-
грузкой и девять перемещений в тече-

ние 5 с без нагрузки.

В начале испытаний для прира-
ботки шлицевое соединение испытыва-
лось без нагрузки в течение четырех ча-
сов, затем производилось постепенное
увеличение нагрузки через каждые 2 ч
с интервалом 0,25 полной нагрузки.

В процессе испытаний измерялась
величина осевого усилия перемещения
шлицевой вилки относительно шлице-
вой втулки, периодичность измерений –
100 тыс. циклов нагружений шлицевого
соединения. Долговечность оценивалась
величиной коэффициента трения μ ,
определяемого по формуле

$$\mu = \frac{P \cdot r_{cp}}{M_{кр}}$$

где P – величина осевого усилия в шли-
цевом соединении, Н; r_{cp} – средний ра-
диус шлиц, м; $M_{кр}$ – величина нагружа-

ющего крутящего момента, Н·м.

Величина осевого усилия в шлицевом соединении измерялась тензодатчиками сопротивлением 200 Ом, наклеенными на два противоположных шипа с обеих сторон крестовины, соединенная по мостовой схеме. Данная схема увеличивает чувствительность замеров, т. к. если датчики на одной стороне крестовины работают на сжатие, то на другой стороне – на растяжение.

Критерием оценки долговечности шлицевого соединения с полимерным

покрытием являлась величина коэффициента трения в шлицевом соединении без полимерного покрытия, которая составляла от 0,25 до 0,27, не более, независимо от степени износа полимерного покрытия.

Результаты стендовых испытаний карданных передач со шлицевым соединением с полимерным покрытием на долговечность при нагрузке крутящим моментом 1500 Н·м представлены в табл. 3.

Табл. 3. Результаты стендовых испытаний карданных передач со шлицевым соединением с полимерным покрытием на долговечность при нагрузке крутящим моментом 1500 Н·м

Число циклов нагружения, тыс. циклов	Значение величин осевого усилия и коэффициента трения испытуемых образцов карданных передач					
	Образец № 1		Образец № 2		Образец № 3	
	Величина осевого усилия P , Н	Коэффициент трения μ	Величина осевого усилия P , Н	Коэффициент трения μ	Величина осевого усилия P , Н	Коэффициент трения μ
Начало	4451	0,103	5262	0,129	4187,5	0,097
100	4925	0,114	6053	0,140	5037,5	0,116
200	5262	0,121	6336	0,146	5366,5	0,125
300	5313	0,123	6508	0,151	5853	0,129
400	5364	0,125	6595	0,152	5638	0,130
500	5482	0,127	6697	0,155	5712,5	0,132
600	5513	0,129	6866	0,158	5759	0,134
700	5703	0,132	6964	0,161	5871	0,136
750	5737	0,132	7000	0,162	5948	0,137
800	5777	0,133	7098	0,164	5973	0,138
850	5828	0,135	7178	0,166	5986	0,138
900	6000	0,138	7184	0,166	6025	0,139
950	6063	0,140	7200	0,167	6050	0,139
1000	6076	0,140	7205	0,167	6070	0,140
1100	6235	0,144	7267	0,168	6383	0,147
1200	6375	0,147	7379	0,170	6449,5	0,149
1300	7165	0,165	7467	0,172	7014	0,162
1400	7421	0,171	7639	0,176	7303	0,169
1500	7607	0,177	7821	0,181	7441	0,172

Проведенные стендовые испытания показали значительное снижение коэффициента трения в шлицевом соединении с полимерным покрытием (0,097...0,172) по сравнению с коэффициентом трения в шлицевом соединении без покрытия (0,25...0,27).

Эксплуатационный ресурс карданных передач со шлицевым соединением с полимерным покрытием достигает не менее 500 тыс. км пробега транспортного средства без проведения технического обслуживания, что подтверждено результатами испытаний карданных передач в составе автомобилей ОАО «МАЗ» и ПАО «КАМАЗ». Серийно производимые карданные передачи со шлицевым соединением без полимерного покрытия имеют ресурс 120...150 тыс. км пробега автомобилей, при этом техническое обслуживание (смазку шлицевого соединения) необходимо проводить через каждые 15...20 тыс. км пробега.

Заключение

Результатом проведенных работ является внедрение в производство технологии нанесения полимерных

покрытий для обеспечения изготовления коррозионно-стойких, износостойких и не требующих технического обслуживания шлицевых соединений карданных передач с высокой антизадирной способностью.

Процесс нанесения покрытия требует строгого соблюдения последовательности выполнения технологических операций, технологических режимов предварительной подготовки, грунтования, нагрева и нанесения самого покрытия.

Внедрение в производство технологии нанесения полимерного покрытия на шлицевые соединения позволило создать конструкции современных карданных передач нового поколения с увеличенным эксплуатационным ресурсом.

Проведенные стендовые и эксплуатационные испытания карданных передач со шлицевым соединением с полимерным покрытием подтвердили значительное увеличение их долговечности. Кроме того, удалось значительно повысить долговечность подшипниковых узлов коробок передач и задних мостов автомобилей за счет снижения коэффициента трения и осевых усилий в шлицевой паре карданной передачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кравченко, В. И.** Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 409 с.
2. **Малаховский, Я. Э.** Карданные передачи / Я. Э. Малаховский, А. А. Лапин, Н. К. Веденев. – Москва: Машгиз, 1962. – 156 с.
3. **Беркер, А. Х.** Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А. Х. Беркер. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 464 с.
4. **Иванов, С. Н.** Трансмиссионные валы нового поколения / С. Н. Иванов // Автомобильная промышленность. – 1998. – № 11. – С. 23–27.
5. **Иванов, С. Н.** Карданные передачи ведущих валов трансмиссий машин и систем (конструкция, теория, расчёт, испытания, эксплуатация, ремонт) / С. Н. Иванов. – Москва: НАМИ, 2014. – 232 с.
6. **Заславский, О. Я.** Системный подход как метод исследования долговечности карданной передачи / О. Я. Заславский // Автомобильная промышленность. – 1981. – № 11. – С. 21–24.

Статья сдана в редакцию 25 апреля 2023 года

Геннадий Александрович Костюкович, канд. техн. наук, зам. директора по техническому развитию, ОАО «Белкард». E-mail: gsktb@belcard-grodno.com.

Александр Витальевич Попрукайло, начальник УГТ, главный технолог, магистр, ОАО «Белкард», аспирант, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы. E-mail: ogt@belcard-grodno.com.

Александр Сергеевич Воронцов, декан факультета инновационных технологий, канд. техн. наук, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы. E-mail: a.voroncov@grsu.by.

Денис Сергеевич Калынов, консультант, ООО «Викон-Авто». E-mail: vikon_v@mail.ru.

Gennady Alexandrovich Kostyukovich, Cand. Sc. (Tech.), Deputy Director for Technical Development, Belcard JSC. E-mail: gsktb@belcard-grodno.com.

Alexander Vitalyevich Poprukailo, Chief Technologist, Master Sc. (Tech.), Belcard JSC, post-graduate student, Yanka Kupala State University of Grodno. E-mail: ogt@belcard-grodno.com.

Alexander Sergeevich Vorontsov, Dean of the Faculty of Innovative Technologies, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Yanka Kupala State University of Grodno. E-mail: a.voroncov@grsu.by.

Denis Sergeevich Kalynov, consultant, Vikon-Avto LLC. E-mail: vikon_v@mail.ru.