

И. В. Колесников, В. В. Шаповалов, О. И. Коваленко, К. Н. Политыко, И. А. Колодяжный

НАНЕСЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ PVD-ПОКРЫТИЙ НА ФРИКЦИОННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ШЕСТЕРЕН И МУФТ-ШЕСТЕРЕН ПЕРСПЕКТИВНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ *

Аннотация. Рассмотрена перспективная силовая автоматическая трансмиссия, разработанная учеными РГУПС. В устройстве данной автоматической коробки переключения передач (АКПП) используется оригинальная, не имеющая аналогов муфта-шестерня, используемая в качестве фрикционного усилительного звена. Ввиду отсутствия разрывов потока передаваемой с помощью данной муфты-шестерни мощности и, как следствие, увеличения скорости включения передач удалось увеличить коэффициент полезного действия АКПП. В процессе длительной эксплуатации компоненты и детали данного агрегата, в частности шестерни, подвергаются износу. Одним из способов повышения их износостойкости является нанесение вакуумных покрытий, защищающих поверхности от их интенсивного изнашивания. Для реализации данной задачи методом магнетронного распыления получено высокоэнтропийное покрытие CuCrMnFeCoNi на подложке из стали 40ХН2МА, обладающее однородной структурой и плотным прилеганием к подложке. Трибологические исследования позволили установить низкий коэффициент трения $\mu = 0,12$, который значительно ниже значений подложки из стали. Разработанное покрытие позволит уменьшить коэффициент трения и износ муфты-шестерни.

Ключевые слова: трибология, автоматическая коробка переключения передач, шестерня, муфта-шестерня, фрикционное усилительное звено, КПД, механические и трибологические свойства, PVD, ВЭС, покрытие, магнетрон.

Для цитирования: Нанесение износостойких PVD-покрытий на фрикционные поверхности шестерен и муфт-шестерен перспективной автоматической коробки передач / И. В. Колесников, В. В. Шаповалов, О. И. Коваленко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 49–59. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_49.

Введение и постановка задачи

В современном мире автоматические трансмиссии получили достаточно широкое распространение. Сегодня, согласно статистике продаж новых автомобилей, доля автомашин, оснащенных различного типа автоматическими коробками перемены передач (АКПП), значительно превышает количество автомобилей, оснащенных механическими трансмиссиями.

Автоматические коробки передач бывают различных видов, самые распространенные из них – гидромеханические коробки передач, роботизированные КПП, вариаторы различных типов, секвентальные коробки и др. Помимо очевидных преимуществ, все они не лишены ряда недостатков. Например, гидромеханическая коробка передач имеет минусы в виде низкой скорости переключения передач по сравнению с роботизированной, но в то же время она надежна за счет своей относительно простой конструкции и имеет большой ресурс. Роботизированная коробка переключения передач (РКПП) с двумя сцеплениями состоит из двух объединенных механических коробок передач в одном корпусе. Данный агрегат технологичен, обладает высокой скоростью смены передач, компактными размерами и позволяет экономить топливо. Однако у его управляющего блока – мехатроника – случаются отказы и поломки; кроме того, особенностью устройства РКПП является узел сцеплений, который со временем изнашивается и требует замены, в отличие от гидромеханической АКПП [1–3]. Коробки передач с вариаторами CVT также имели свои изъяны в виде некорректного софта, что приводило к интенсивному износу конусов и ремней. Также рано выходили из строя подшипники первичного и вторичного валов, и только в процессе многочисленных ревизий они обрели повышенную надежность.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30007).

Сегодня массовую популярность начали получать трансмиссии с гибридным приводом, имеющие в своей конструкции электродвигатель, который позволяет автомобилю передвигаться исключительно на электротяге или же в комбинированном – гибридном режиме, когда транспортное средство приводится в движение тандемом двигателя внутреннего сгорания (ДВС), работающего на органическом топливе, и электромотора, запитанного от батареи. Иными словами, эволюция коробок передач не стоит на месте, а работа над их усовершенствованием ведется и сегодня.

Специалистами РГУПС в рамках программы по импортозамещению был разработан прототип отечественной коробки передач, в конструкции которой применены не имеющие аналогов инновационные муфты-шестерни, являющиеся одними из ключевых компонентов данного агрегата и выполняющие роль фрикционного усилительного звена (ФУЗ) [4].

Схема и 3D-модель муфты-шестерни для быстроходных мобильных технических систем (легковых автомобилей, путевых машин) приведены на рис. 1.

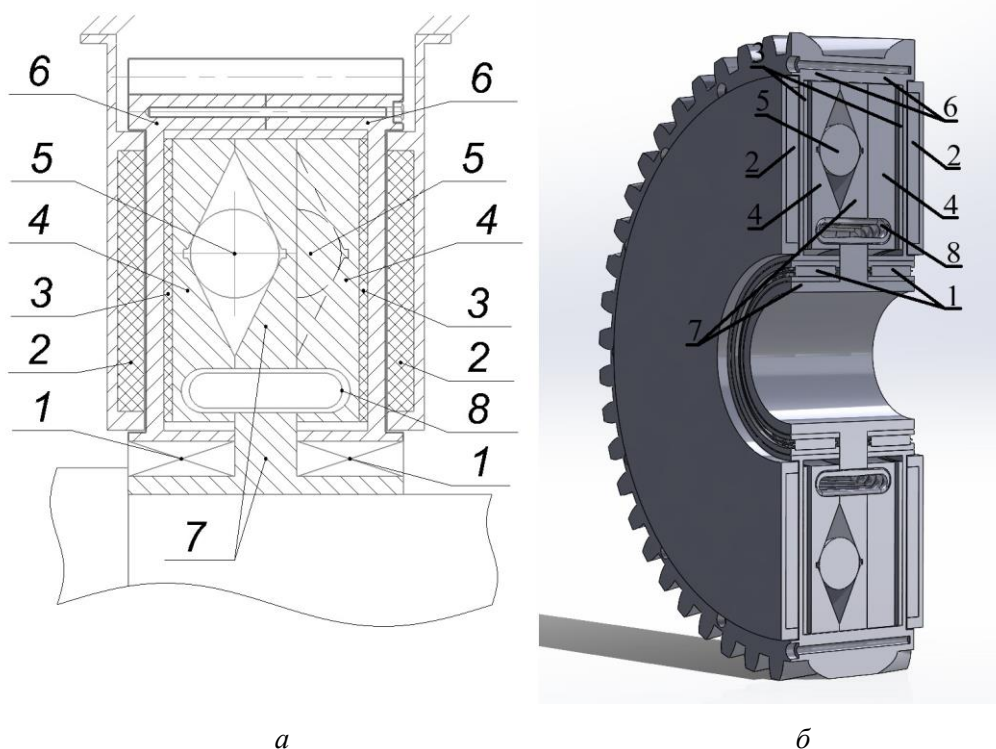


Рис. 1. Схема (а) и 3D-модель (б) муфты-шестерни для быстроходных МТС, созданная в программе Solidworks:

- 1 – игольчатые подшипники; 2 – электромагниты; 3 – стальные диски с металлокерамическими накладками; 4 – ведомые диски включения; 5 – тело качения; 6 – двухсоставной корпус; 7 – ведущий диск включения; 8 – гаситель крутильных колебаний

Концепция работы данного фрикционного усилительного звена для быстроходных мобильных технических систем реализована следующим образом: осуществляется подача антирезонансного напряжения на электромагниты 2, расположенные на боковых гранях механизма, те, в свою очередь, начинают притягивать ведомые диски включения 4 по направлению к двухсоставному корпусу 6 муфты-шестерни [5]. При вступлении во фрикционный контакт стальных дисков с металлокерамическими накладками 3, расположенными на внутренних стенках двухсоставного корпуса 6 муфты-шестерни, ведомые диски включения 4 передают крутящий момент на двухсоставной корпус 6 от ведущего диска включения 7, закрепленного на валу, посредством скатывающего усилия. При подаче резонансного напряжения на электромагниты 2 стальные ведомые диски включения 4 отсоединяются от стальных дисков с металлокерамическими накладками 3, а затем возвращаются в исходное положение.

В основе конструкции перспективной трансмиссии лежит двухвальная схема с шестью передачами (рис. 2): на ведущем валу для первых трех передач используются стандартные шестерни, а на ведомом валу применяются оригинальные муфты-шестерни. На последующих, высших передачах, наоборот, на ведущем валу задействуются муфты-шестерни, а на ведомом – обыкновенные шестерни. Такое

конструктивное решение применено для равномерного распределения нагрузки на агрегат и его сбалансированности. Его устройство реализовано таким образом, что во время включения первой передачи уже подготовлена к работе вторая, после активации второй ступени готова к включению третья передача и т. д. Важнейшим условием для выбора варианта шестерней и зубчатых колес для работы коробок передач, имеющих высокий КПД, является их вид, а также тип их зацепления. Наиболее оптимальным вариантом по эффективности работы и затратам в производстве является косозубая механическая передача с зацеплением Новикова [5, 6]. Это обусловлено тем, что данный тип зацепления снижает уровень шума, обладает более высокой нагрузочной способностью по контактным напряжениям и имеет большие передаточные числа.

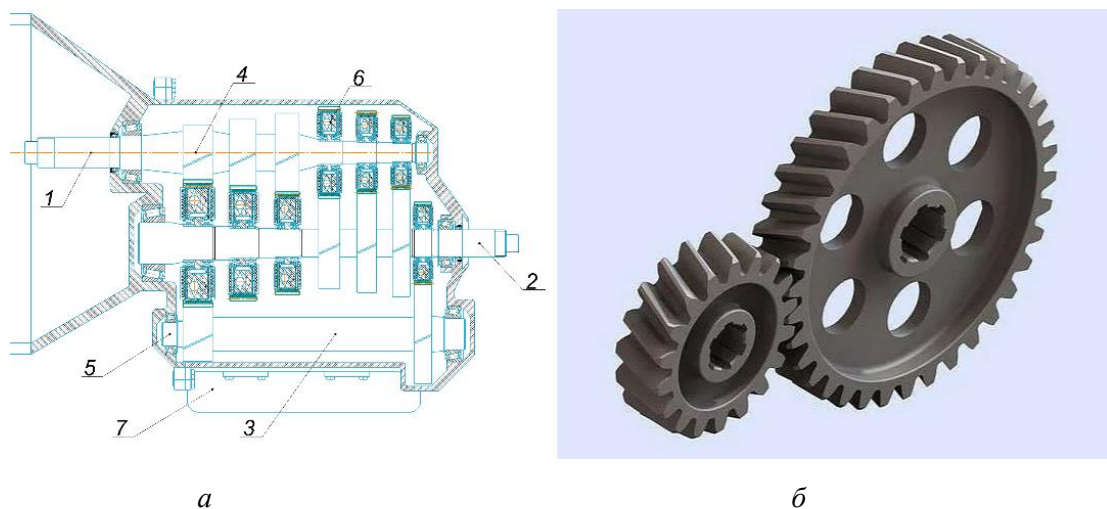


Рис. 2. Перспективная шестиступенчатая автоматическая коробка передач:

а – схема АКПП: 1 – ведущий вал; 2 – ведомый вал; 3 – вал задней передачи; 4 – косозубая шестерня; 5 – подшипник; 6 – зеркальная муфта-шестерня, 7 – электронный блок управления;
б – зубчатое зацепление косозубых шестерен

Динамические нагрузки на КПП возможно снизить с помощью включения последующей передачи, которая вращается и предварительно подготовлена к включению, тем самым подтверждая минимальный разрыв потока передаваемой мощности [5].

Для компонентов всех типов коробок передач, особенно таких, как шестерни и планетарные передачи, равно как и для других различных узлов трения, очень важны следующие параметры: качество смазочной композиции – в составе присутствует только базовое масло и пакет присадок, совместимость трансмиссионной жидкости с данным агрегатом ввиду прямого влияния на его безотказность, долговечность и ресурс.

Механические и автоматические коробки передач требуют замены масла через каждые 50 000–60 000 км. Для автоматических коробок передач, как и в нашем перспективном агрегате, используется масло с вязкостью по SAE 75W-85 и уровнем качества API GL-4. Важными составляющими в химическом составе трансмиссионной жидкости являются присадки, добавляемые к базовому маслу, которые позволяют повысить антикоррозийные свойства, снизить пенообразование, расширить температурный режим работы коробки передач и т. д. Применение масел GL-4 актуально для роботизированных коробок передач, поскольку в них в качестве противозадирных присадок используются компоненты на основе серы и фосфора. Такие добавки в определенных количествах предназначены для предотвращения появления эффекта микросваривания контактирующих поверхностей при точечных высоких температурах, возникающих в условиях экстремальных нагрузок. Этот эффект встречается в парах трения, где нагрузки значительно выше из-за малого пятна контакта рабочих поверхностей.

В то же время присадки, включающие такие элементы, как сера и фосфор, в зависимости от их процентного содержания в маслах могут оказывать негативное влияние: окислять детали из бронзы, меди или их сплавов. Такое воздействие может иметь катастрофические последствия для колец синхронизаторов в коробках передач.

В разных типах трансмиссий применяются шестерни, изготавливаемые из углеродистых сталей 40, 45, 50, 55, а также легированных сталей марок 40X, 45X, 40XH, 30XГТ, 40XФА, 55Г и др. [7], и, безусловно, их износ через определенный срок эксплуатации неизбежен. Важной задачей в обеспечении

должной надежности коробок передач является продление срока эксплуатации их шестерен и планетарных рядов, а также снижение износа данных компонентов. Для этого мы предлагаем повысить твердость зубьев шестерен методом нанесения вакуумного высокоэнтروпийного покрытия системы CuCrMnFeCoNi в режиме магнетронного распыления, это актуально для современных существующих автоматических коробок передач, в том числе и для перспективной, описанной выше конструкции (см. рис. 2). Такой способ позволит увеличить долговечность и повысить надежность предлагаемой АКПП.

Материалы и методы исследования

Для формирования высокоэнтропийного покрытия CuCrMnFeCoNi в качестве базовой была выбрана система Co-Cr-Fe-Mn-Ni [8] в виде многокомпонентного твердого раствора. Из бинарных диаграмм компонентов данной системы следует, что система Co-Cr-Fe-Mn-Ni обладает широкой областью неограниченных твердых растворов в подавляющем большинстве ее бинарных подсистем: Fe-Co, Co-Ni, Fe-Ni, Co-Mn, Fe-Mn, Cr-Mn, Cr-Fe, Cr-Ni. Также данная система является однофазной и характеризуется заметной микроструктурной стабильностью в течение длительного времени [9]. Отметим, что все элементы системы Cr-Mn-Fe-Co-Ni расположены рядом в таблице Д. И. Менделеева, в одном ее периоде. Такое расположение позволяет прогнозировать образование общей кристаллической решетки твердого раствора. Чтобы система была высокоэнтропийной, она должна соответствовать пяти критериям, выполнение которых характеризует сплав как высокоэнтропийный. К ним относятся энтропия смешения $\Delta S_{\text{mix}} \geq 5$, разница атомных размеров (атомных радиусов) компонентов δ , энтальпия смешения ΔH_{mix} , разница электроотрицательности компонентов $\Delta \chi$, концентрация валентных электронов – *VEK*. Система может быть отнесена к классу высокоэнтропийных, если она удовлетворяет следующим значениям: $0 \leq \delta \leq 8,5 \%$; $7 \leq \Delta H_{\text{mix}} \leq 22$ кДж/моль; $11 \leq \Delta S_{\text{mix}} \leq 19,5$ Дж/(К·моль) [10–12]. Добавление Cu в данную систему обусловлено не только повышением $\Delta S_{\text{mix}} = 14,9$ Дж/(К·моль), но и снижением коэффициента трения покрытия.

Нанесение высокоэнтропийного покрытия CuCrMnFeCoNi производилось методом магнетронного распыления на вакуумной установке BRV600, разработанной и смоделированной научным коллективом РГУПС. Уникальность данной установки заключается в универсальном подходе выполнения программ нанесения покрытий разными методами PVD и их чередованием без выемки образцов из рабочей камеры, что существенно повышает качество наносимых покрытий из-за отсутствия влияния внешней среды. Магнетронное напыление покрытий CuCrMnFeCoNi проводилось при низкой температуре (~250 °С), которая совпадает с температурой отпуска закаленной стали 40ХН2МА (образцы с мартенситной структурой), поэтому для этого типа покрытий нивелирование структуры образцов подложки не происходит и влияние подложки в образцах с сорбитной структурой и мартенситной структурой остается актуальным вопросом.

В качестве подложек использованы полированные образцы (не ниже 10-го класса чистоты с $R_a \leq 0,12$ мкм и $R_z \leq 0,6$ мкм по ГОСТ 2789-73¹) из конструкционной низколегированной стали 40ХН2МА в виде пластины с размерами 50×30×5 мм. Физико-механические характеристики использованных образцов-подложек из стали 40ХН2МА составляли после закалки и высокого отпуска (структура сорбита) следующие значения: $H = 2,5$ ГПа, $E = 200$ ГПа, $H/E = 0,0125$, $H^3/E^2 = 0,00039$ ГПа; после закалки и низкого отпуска (структура мартенсита): $H = 5,2$ ГПа, $E = 200$ ГПа, $H/E = 0,026$, $H^3/E^2 = 0,00352$. Существенная разница в физико-механических свойствах покрытия и подложки может негативно сказываться на адгезии покрытий, поэтому для увеличения адгезии на границе «подложка – покрытие» перед нанесением основного состава покрытия был осажден подслоем Cr с помощью вакуумно-дугового метода осаждения покрытий.

Перед стадией нанесения покрытия поверхность образцов подвергалась ионному травлению, которое проводилось с помощью встроенного ионного источника ионами Ar^+ при давлении в камере ~0,7 Па, температуре ~400 °С и опорного напряжении 1000 В в течение 10 мин [13].

Для аттестации толщины, микроструктуры и состава нанесенных покрытий был использован электронный микроскоп Zeiss EVA MA 18, оснащенный энергодисперсионным анализатором X-Max 50 [14].

Физико-механические свойства определялись с помощью NanoTest 600 по ГОСТ 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) по методу непрерывного индентирования определяли модуль упругости E и твердость H , индекс упругости H/E и индекс пластичности H^3/E^2 [14, 15]

Трибологические испытания покрытий проводились на машине трения TRB (Anton Paar Tritec) в соответствии с методиками DIN 50324 и ASTM G99 [16, 17] по схеме испытаний «шар – диск», профиль

¹ ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 8 с. – URL: <http://www.omegаметалл.ru/Data2/1/4294847/4294847701.pdf>

лунки износа определяли при помощи оптического профилометра Zygo NewView 600. Контрольный образец представлял собой шар из оксида алюминия (Al_2O_3) диаметром 6 мм. Приведенное оборудование и измерительные методики позволяют определять такие трибологические параметры, как коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца J , а также длину пути (дорожки трения) L , пройденного образцом до разрушения покрытия и измеряемого в метрах [14].

Результаты и их обсуждение

Для определения толщины, элементного состава и качества покрытия CuCrMnFeCoNi был использован метод энергодисперсионного анализа (EDAX), результаты исследований представлены на рис. 3.

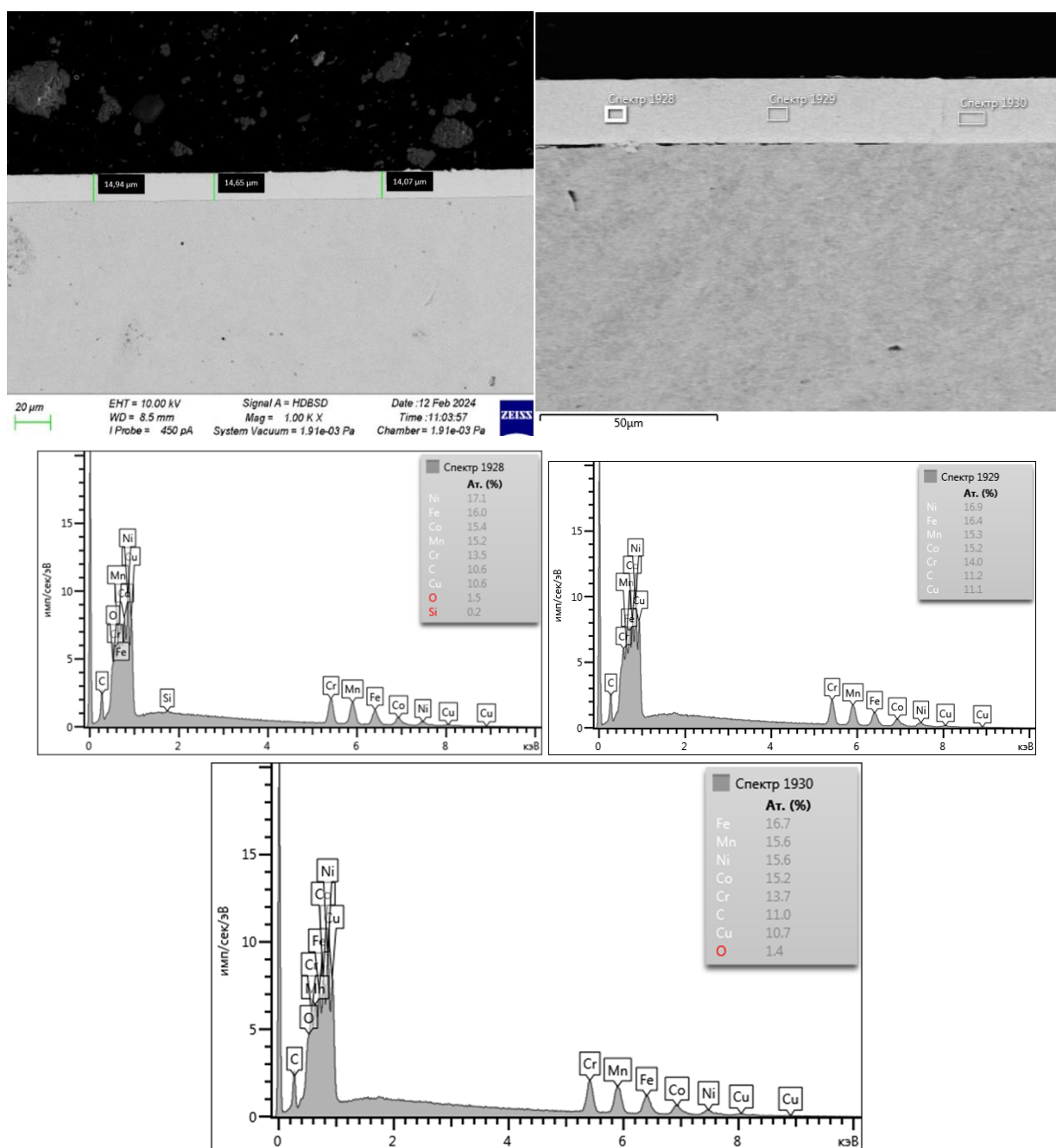


Рис. 3. Структура покрытия CuCrMnFeCoNi в поперечном сечении и энергетические спектры его элементов по результатам EDAX-анализа

По итогам анализа рис. 3, можно сделать вывод, что полученное покрытие характеризуется однородной структурой и плотным прилеганием к подложке, что может говорить о высокой адгезии покрытия с подложкой. Толщина покрытия от 14 до 14,9 мкм позволяет определить его элементный состав и сделать вывод о том, что химический состав покрытия соответствует составу мишени. Магнетронный метод распыления позволил регулировать толщину покрытия и получить образцы с толщиной от 11 до 19 мкм при времени нанесения 6–7 часов. Данный фактор очень важен, так как при нанесении данной системы на муфту-шестерню требуется учитывать допуски, указанные в конструкторской документации. Скорость формирования покрытия при использовании магнетронного метода составила $a_D = 0,031 \dots 0,045$ мкм/мин.

По результатам выполненного энергодисперсионного анализа (EDAX) средневзвешенная атомная концентрация элементов c_i в покрытии составила 11, 14, 15, 16, 15 и 17 ат. % для Cu, Cr, Mn, Fe, Co, Ni соответственно. Данное элементное содержание компонентов принято по умолчанию в качестве ориентировочного состава изучаемых высокоэнтропийных покрытий, то есть далее по умолчанию рассматривается покрытие $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$. Полученный состав выделяется минимальным расхождением атомной концентрации элементов c_i , что способствует увеличению энтропии смешения S_{mix} , уменьшению разницы атомных размеров δ и в конечном итоге значительно увеличивает вероятность образования твердого раствора.

Для определения физико-механических свойств покрытия $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ изначально требовалось убедиться в отсутствии влияния подложки на измеряемую твердость H и модуль упругости E . Для этого были проведены измерения с различной нагрузкой, чтобы определить максимальную глубину проникновения индентора. По результатам наноиндентирования была получена кривая зависимости глубины проникновения индентора от нагрузки, приведенная на рис. 4.

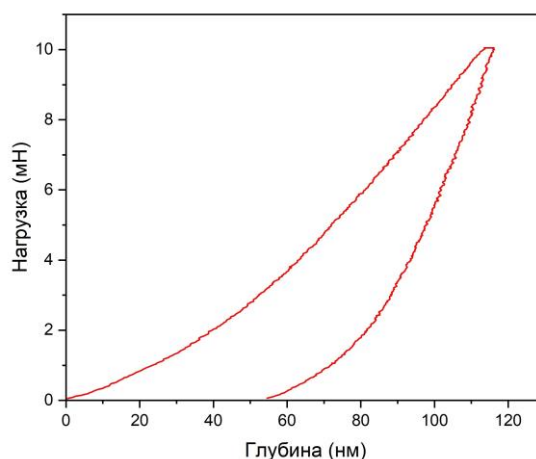


Рис. 4. Зависимость глубины внедрения индентора от прилагаемой нагрузки при индентировании покрытий

Из рис. 4 видно, что глубина погружения индентора при максимальной нагрузке 10 мН составила 115 нм, данное значение глубины значительно ниже толщины покрытия (14...14,9 мкм). Твердость покрытия составила 8,41 ГПа. Полученные результаты позволили рассчитать сопротивление упругой H/E и пластической деформаций H^3/E^2 .

Полученные значения физико-механических свойств покрытия $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ были сравнены с характеристиками подложки с сорбитной и мартенситной структурой, которые представлены в нижеприведенной таблице.

Физико-механические свойства подложки и покрытия

Объект исследования	H , ГПа	E , ГПа	H/E	H^3/E^2 , ГПа
40ХН2МА сорбитная структура	2,5	200	0,0125	0,00039
40ХН2МА мартенситная структура	5,2	200	0,026	0,00352
$\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$	8,41	194,3	0,043	0,0158

Приведенные в таблице результаты анализа физико-механических свойств покрытий системы $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ отражают усредненные значения H и E для всех образцов, полученных на подложке с сорбитной и мартенситной структурой, что свидетельствует об отсутствии влияния подложки на физико-механические свойства покрытия. Из анализа таблицы можно сделать вывод, что покрытие $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ значительно повысило физико-механические свойства образцов: с сорбитной структурой H и H/E в $\sim 3,5$ раза, а H^3/E^2 в $\sim 40,5$ раза. Отметим, что в обоих случаях модуль упругости находится примерно на одном уровне с подложкой. Физико-механические характеристики покрытия $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ на подложке с мартенситной структурой находятся примерно на одном уровне с подложкой, но с незначительным увеличением твердости, что способствует увеличению H/E (в $\sim 1,5$ раза) и H^3/E^2 (в $\sim 2,5$ раза).

С целью унификации трибологических результатов условия проведения испытаний определялись при фиксированных значениях параметров для системы $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$: скорость скольжения $v = 1$ мм/с; путь трения (пробег) при радиальном движении по окружности $L = 1,8$ м; нормальное усилие на штифте (нагрузка) $N = 5$ Н. На рис. 5 изображен профиль поверхности образцов после трибологических испытаний, а также приведен график зависимости коэффициента трения от времени испытания, глубины дорожки.

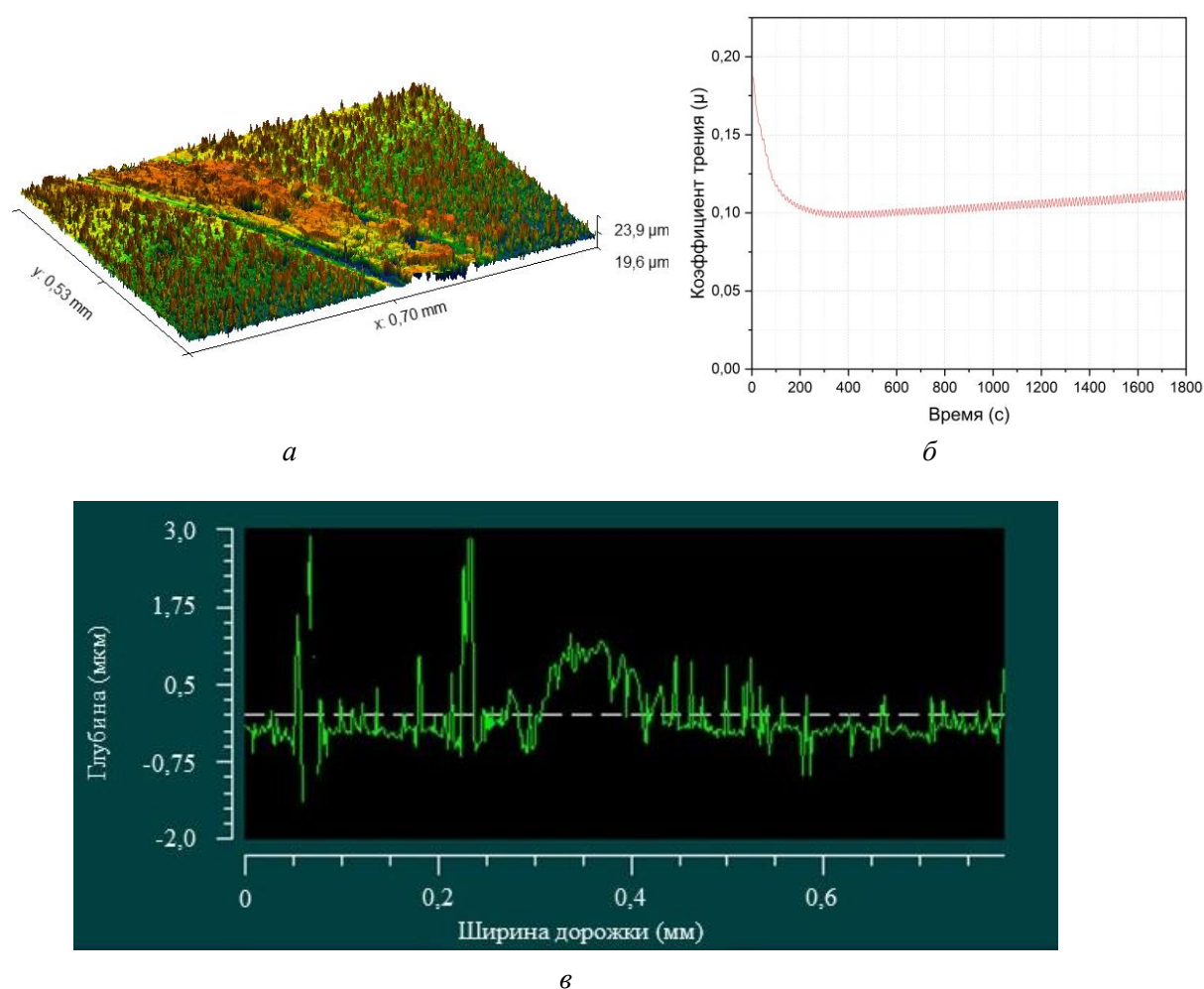


Рис. 5. Профиль поверхности образцов после трибологических испытаний (а), график зависимости коэффициента трения (б), глубина дорожки трения (в)

Из рис. 5, б видно, что покрытие $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ на начальном этапе исследования имеет коэффициент трения $\mu = 0,18$. Это связано с образованием колебаний из-за неровностей поверхности покрытия, данный факт, можно отметить на рис. 5, а. Также по графику на рис. 5, б можно наблюдать, что неровности в течение 300 секунд устранились за счет приработки. Далее в ходе всего испытания коэффициент трения был стабилен, медленно увеличиваясь к концу испытания до значения $\mu = 0,12$, что значительно ниже значений последнего для подложки из стали 40ХН2МА – $\mu \approx 0,6 \dots 0,8$. На рис. 5, а

видно, что при испытании произошло образование дорожки трения, но в заданных условиях испытания износ покрытий связан только с приработкой поверхности покрытия с контробразцом. Особенно это заметно на рис. 5, в, который объясняет колебания коэффициента трения на рис. 5, б в течение всего времени исследования за счет неровности дорожки трения без явного выделенного минимума по глубине. В связи с этим не представляется возможным установить интенсивность износа J , поэтому значение величины износа в данной работе не приводится. Полученные результаты позволяют провести дальнейшие трибологические исследования с увеличением нагрузочно-скоростных характеристик, приближенных к эксплуатационным условиям.

Заключение

Подводя итоги настоящему исследованию, можно проследить тенденцию активного внедрения современных типов автоматических трансмиссий, появление различных гибридных схем с использованием электродвигателей, которые интегрируются в картеры коробок передач. Такие решения, применяемые конструкторами в автомобилестроении, производстве техники специального назначения и путевых машин, необходимы для повышения экономичности расхода топлива и производительности силовых установок, а также для снижения выбросов углеводородов.

В конструкции предлагаемой нами современной коробки передач применена муфта-шестерня – оригинальное фрикционное усилительное звено, являющееся одним из ключевых компонентов перспективного агрегата, благодаря которому повышается оперативность включения передач, увеличивается КПД данной трансмиссии. Несомненным риском в процессе эксплуатации такого агрегата, как автоматическая коробка передач, является износ его компонентов, в частности шестерен. Фрикционные рабочие поверхности шестерен и муфт-шестерен изнашиваются в ходе длительной эксплуатации или несвоевременного обслуживания коробок передач: их зубья стираются, выкрашиваются, обламываются. В связи с этим для обеспечения длительного ресурса автоматической коробки передач предлагается нанесение износостойких вакуумных покрытий на ее рабочие поверхности. Примером такого покрытия может быть $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$.

Исследованное покрытие $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ полученное на подложке 40ХН2МА с сорбитной и мартенситной структурой, позволяет сделать следующие выводы:

1 Применение магнетронного метода распыления позволило получить покрытие с высокой адгезией, толщиной от 14 до 14,9 мкм.

2 Результаты исследования физико-механических свойств свидетельствуют об увеличении H и H/E в ~3,5 раза, а сопротивления пластической деформации в ~40,5 раза для образца с сорбитной структурой. Для образца с мартенситной структурой физико-механические характеристики находятся примерно на одном уровне с подложкой, но с незначительным увеличением твердости, что способствует повышению сопротивления упругой (в ~1,5 раза) и пластической (в ~2,5 раза) деформациям. Отметим, что в обоих случаях модуль упругости был на одном уровне с подложкой.

3 Трибологические испытания установили, что покрытия $\text{Cu}_{0,13}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,16}\text{Fe}_{0,18}\text{Co}_{0,17}\text{Ni}_{0,19}$ имеют достаточно низкие значения коэффициента трения $\mu = 0,1 \dots 0,12$, что значительно ниже значений последнего для подложки из стали 40ХН2МА – $\mu \approx 0,6 \dots 0,8$. В ходе проведенных испытаний не удалось установить величину износа J , что позволяет провести дальнейшие трибологические исследования с увеличением нагрузочно-скоростных характеристик, приближенных к эксплуатационным условиям.

Список литературы

- 1 **Петров, А. П.** Современные конструкции автоматических коробок передач / А. П. Петров ; Курганский государственный университет. – Курган : КГУ, 2015. – 80 с. – ISBN 978-5-4217-0333-4.
- 2 **Харитонов, С. А.** Автоматические коробки передач / С. А. Харитонов. – Москва : Астрель, 2003. – 335 с. – ISBN 5-170-17670-8.
- 3 Коробка передач. Устройство, принцип работы и разновидности коробки передач DSG // ТехАвтоПорт. Про автомобили. В деталях. – 2024. – URL: <https://techautoport.ru/transmissiya/korobka>

References

- 1 **Petrov, A. P.** Modern designs of automatic transmissions / A. P. Petrov ; Kurgan State University. – Kurgan : KSU, 2015. – 80 p. – ISBN 978-5-4217-0333-4.
- 2 **Kharitonov, S. A.** Automatic transmissions / S. A. Kharitonov. – Moscow : Astrel Publishing House, 2003. – 335 p. – ISBN 5-170-17670-8.
- 3 Transmission. Design, principle of operation and types of DSG gearbox // TechAutoPort. About cars.

peredach/korobka-peredach-dsg.html (дата обращения: 25.08.2024).

4 Патент № 2674899 РФ, МПК F16D 65/00 (2006.01). Способ повышения эффективности фрикционных систем / В. В. Шаповалов, М. М. Шестаков, Р. А. Корниенко [и др.]; заявитель В. В. Шаповалов. – № 2016128401; заявл. 12.07.2016; опубл. 13.12.2018, Бюл. № 35. – 20 с.

5 Повышение эффективности закрытых узлов трения / В. В. Шаповалов, Т. Л. Саямова, Д. А. Рябыш [и др.] // Механика и трибология транспортных систем : сборник статей международной научной конференции.. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 166–170. – ISBN 978-5-907295-52-0.

6 ГОСТ 17744-72. Библиографическая запись. Библиографическое описание : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден Государственным комитетом стандартов Совета Министров СССР 7 апреля 1972 г. (протокол № 41), введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 24 мая 1972 г. № 1057 – Москва : Издательство стандартов, 1972. – 19 с.
7 Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский, Ю. И. Астахов [и др.]. – Москва : Машиностроение-1, 2003. – 780 с.

8 Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / З. Б. Батаева, А. А. Руктуев, И. В. Иванов [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 116–146. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.

9 Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I. Chang, P. Knight, A. J. B. Vincent // Materials Science and Engineering A. – 2023. – Vol. A375-377. – P. 213–218. – DOI 10.1016/j.msea.2003.10.257.

10 Yeh, J. W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys / J. W. Yeh // JOM : the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2013. – No. 65. – P. 1759–1771. – DOI 10.1007/s11837-013-0761-6.

11 Miedema Calculator : A thermodynamic platform for predicting formation enthalpies of alloys within framework of Miedema's Theory / R. F. Zhang, S. H. Zhang, Z. J. He [at al.] // Computer Physics Communications. – 2016. – Vol. 209. – P. 58–69. – DOI 10.1016/j.cpc.2016.08.013.

In detail. – 2024. – URL: <https://techautoport.ru/transmissiya/korobka-peredach/korobka-peredach-dsg.html> (date of access: 08/25/2008).

4 Patent No. 2674899 Russian Federation, IPC F16D 65/00 (2006.01). A way to improve the efficiency of friction systems / V. V. Shapovalov, M. M. Shestakov, R. A. Kornienko [et al.]; applicant V. V. Shapovalov. – No. 2016128401; decl. 07/12/2016; publ. 12/13/2018, Bull. No. 35. – 20 p.

5 Increasing the efficiency of closed friction units / V. V. Shapovalov, T. L. Sayamova, D. A. Ryabish [et al.] // Mechanics and tribology of transport systems : collection of articles of the international scientific conference. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 166–170. – ISBN 978-5-907295-52-0.

6 GOST 17744-72. Bibliographic record. Bibliographic description : state standard of the USSR : official publication : approved by the State Committee of Standards of the Council of Ministers of the USSR on April 7, 1972 (protocol No. 41), introduced into action by the Resolution of the State Standards Committee of the Council of Ministers of the USSR dated May 24, 1972 No. 1057 – Moscow : Standards Publishing House, 1972. – 19 p.

7 Brand book of steels and alloys / A. S. Zubchenko, M. M. Koloskov, Yu. V. Kashirsky, Yu. I. Astakhov [at al.]. – Moscow : Mashinostroyeniye-1, 2003. – 780 p.

8 A review of studies of alloys developed on the basis of the entropy approach / Z. B. Bataeva, A. A. Ruktuev, I. V. Ivanov [at al.] // Metal processing (technology, equipment, tools). – 2021. – Vol. 23, No. 2. – P. 116–146. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.

9 Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I. Chang, P. Knight, A. J. B. Vincent // Materials Science and Engineering A. – 2023. – Vol. A375-377. – P. 213–218. – DOI 10.1016/j.msea.2003.10.257.

10 Yeh, J. W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys / J. W. Yeh // JOM : the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2013. – No. 65. – P. 1759–1771. – DOI 10.1007/s11837-013-0761-6.

11 Miedema Calculator : A thermodynamic platform for predicting formation enthalpies of alloys within framework of Miedema's Theory / R. F. Zhang, S. H. Zhang, Z. J. He [at al.] // Computer Physics Communications. – 2016. – Vol. 209. – P. 58–69. – DOI 10.1016/j.cpc.2016.08.013.

12 Многокомпонентные и высокоэнтропийные сплавы и нитридные покрытия на их основе / А. Д. Погребняк, Ф. Ф. Комаров, В. М. Береснев [и др.] ; Москва : ЛЕНАНД, 2021. – 336 с. – ISBN 978-5-97108-872-1.

3 Покрытия DLC, стабилизированные азотом: оптимизация свойств и режимов нанесения с использованием алгоритмов рандомизированных деревьев и нейронных сетей / А. И. Воропаев, В. И. Колесников, О. В. Кудряков [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

14 **Политыко, К. Н.** Формирование PVD-покрытий для трибологического назначения / К. Н. Политыко, Д. С. Мантуров // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 81–93. –ISSN 1818-5509.

15 **Головин, Ю. И.** Наноиндентирование и его возможности / Ю. И. Головин. – Москва : Машиностроение, 2009. – 312 с. – ISBN 978-5-94275-476-1 (в пер.).

16 IN 50324-1992. Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system) [Тела твердые. Модельные испытания на трение и износ при трении скольжения] : международный (зарубежный) стандарт. ISO 17.040.20. Properties of surfaces [Свойства поверхностей]. Дата опубликования 01.07.1992. Язык оригинала : немецкий. – 6 с. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (дата обращения: 23.10.2024).

17 ASTM G99-17. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (дата обращения: 23.10.2024).

12 Multicomponent and high-entropy alloys and nitride coatings based on them / A.D. Pogrebnyak, F. F. Komarov, V. M. Beresnev [et al.] – Moscow : LENAND, 2021. – 336 p. – ISBN 978-5-97108-872-1.

13 DLC coatings stabilized with nitrogen: optimization of application properties and modes using randomized tree algorithms and neural networks / A. I. Voropaev, V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov [et al.] // Physical mesomechanics. – 2024. – Vol. 27, No. 2. – P. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

14 **Polityko, K. N.** Formation of PVD coatings for tribological purposes / K. N. Polityko, D. S. Manturov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 81–93. –ISSN 1818-5509.

15 **Golovin, Yu. I.** Nanoindentation and its possibilities / Yu. I. Golovin. – Moscow : Mashinostroyeniye, 2009. – 312 p. – ISBN 978-5-94275-476-1 (bound).

16 IN 50324-1992 Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system) [Tela tverdye. Model'nye ispytaniya na trenie i iznos pri trenii skol'zheniya] : an international (foreign) standard. ISO 17.040.20. Properties of surfaces [Svoystva poverhnostey]. Date of publication 07/01/1992. Original language : German. – 6 p. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (date of access: 10/23/2024).

17 ASTM G99-17. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (date of access: 10/23/2024).

I. V. Kolesnikov, V. V. Shapovalov, O. I. Kovalenko, K. N. Polityko, I. A. Kolodyazhny

APPLICATION OF WEAR-RESISTANT PVD COATINGS ON THE FRICTION SURFACES OF GEARS AND GEAR COUPLINGS OF A PROMISING AUTOMATIC TRANSMISSION

Abstract. A promising power automatic transmission developed by RSTU scientists is considered. The device of this automatic transmission (AT) uses an original, unparalleled gear clutch used as a friction reinforcement link. Due to the absence of discontinuities in the flow of power transmitted using this gear coupling and, as a result, an increase in the gear speed, it was possible to increase the efficiency of the automatic transmission. During long-term operation, the components and parts of this unit wear out. One of the ways to increase their wear resistance is to apply vacuum coatings that protect surfaces from their intense wear. To achieve this task, a high-entropy CuCrMnFeCoNi coating on a 40KHN2MA steel substrate was obtained by magnetron sputtering. The coating has a uniform structure and a tight fit to the substrate. Tribological studies have allowed us to establish a low coefficient of friction $\mu = 0,12$, which is significantly lower than the values of the steel substrate. Developed coating will reduce the coefficient of friction and wear of the gear coupling.

Keywords: tribology, automatic transmission, gear, coupling gear, friction reinforcement link, efficiency, mechanical and tribological properties, PVD, HEA, coating, magnetron.

For citation: Application of wear-resistant PVD coatings on the friction surfaces of gears and gear couplings of a promising automatic transmission / I. V. Kolesnikov, V. V. Shapovalov, O. I. Kovalenko [at al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 49–59. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_49.

Сведения об авторах

Колесников Игорь Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
заведующий НИЛ НиИМ НИЧ,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Шапвалов Владимир Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и триботехника»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: sha.vv@bk.ru

Коваленко Олег Игоревич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и триботехника»,
аспирант
e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru

Политыко Кирилл Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
младший научный сотрудник
кафедры «Теоретическая механика»,
аспирант,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Колодяжный Илья Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и триботехника»,
аспирант,
e-mail: 1nexus2mod@gmail.com

Information about the authors

Kolesnikov Igor Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Head of Scientific Laboratory RSTU,
Corresponding Member of RAS,
Doctor of Engineering Sciences,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Shapovalov Vladimir Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Machines and Tribotechnology»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: sha.vv@bk.ru

Kovalenko Oleg Igorevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Machines and Tribotechnology»,
Postgraduate Student,
e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru

Polityko Kirill Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Junior Researcher
Chair «Theoretical Mechanics»,
Postgraduate Student,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Kolodyazhny Ilya Alekseevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Machines and Tribotechnology»,
Postgraduate Student,
e-mail: 1nexus2mod@gmail.com