

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-119-126>

УДК 621.8

Методы создания конструкций карданных передач повышенного ресурса для наземных транспортных средств и сельскохозяйственной техники

Канд. техн. наук Г. А. Костюкович¹⁾, магистр А. В. Попрукайло¹⁾,
докт. техн. наук, доц. Е. В. Овчинников²⁾, канд. техн. наук, доц. В. М. Хвисевич³⁾,
канд. физ.-мат. наук Н. М. Чекан⁴⁾, канд. физ.-мат. наук, доц. А. И. Веремейчик³⁾

¹⁾Открытое акционерное общество «Белкард» (Гродно, Республика Беларусь),

²⁾Гродненский государственный университет имени Я. Купалы (Гродно, Республика Беларусь),

³⁾Брестский государственный технический университет (Брест, Республика Беларусь),

⁴⁾Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Пространственные карданные механизмы, предназначенные для передачи вращательного движения между валами, имеющие угловое перемещение, отличаются многообразием конструктивных решений. Карданные передачи представляют собой сочленение одного или нескольких универсальных шарниров и трубчатых валов. Они компенсируют осевые перемещения, а также передают крутящий момент при постоянных или переменных углах между соединяемыми агрегатами. В процессе эксплуатации карданная передача должна удовлетворительно функционировать в период установленного срока службы, т. е. соответствовать всем требованиям, вытекающими из особенностей ее использования. Поэтому для современной техники актуальна проблема совершенствования карданных передач, повышения их надежности и эргономичности на базе новых конструкторских решений, оптимизированных по динамическим параметрам, применяемым материалам, технологиям изготовления, сборки и эксплуатации. В статье представлен системный подход к созданию карданных передач нового поколения на основе исследований в области условий эксплуатации, материаловедения, технологии материалов, оптимального конструирования. Показано, что по результатам исследований создана новая серия карданных передач с повышенными техническими характеристиками.

Ключевые слова: карданная передача, шарнир, ресурс, износ, износостойкость, отказ, разрушение, факторы изнашивания, трибосистема, долговечность

Для цитирования: Методы создания конструкций карданных передач повышенного ресурса для наземных транспортных средств и сельскохозяйственной техники / Г. А. Костюкович [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 2. С. 119–126. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-119-126>

Methods for Creating Designs of Cardan Gears of Increased Resource for Land Vehicles and Agricultural Machinery

G. A. Kostukovich¹⁾, A. V. Poprykailo¹⁾, Y. V. Auchynnika²⁾, V. M. Khvisevich³⁾,
N. M. Chekan⁴⁾, A. I. Verameichyk³⁾

¹⁾Open Joint Stock Company “Belcard” (Grodno, Republic of Belarus),

²⁾Grodno State University named after Ya. Kupala (Grodno, Republic of Belarus),

³⁾Brest State Technical University (Brest, Republic of Belarus),

⁴⁾State Scientific Institution “Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Spatial cardan mechanisms designed to transmit rotational motion between shafts, having angular displacement, differ in a variety of design solutions. Cardan gears are an articulation of one or more universal joints and tubular shafts

Адрес для переписки

Веремейчик Андрей Иванович
Брестский государственный технический университет
ул. Московская, 267,
224017, г. Брест, Республика Беларусь
Тел.: +375 162 32-17-05
vai_mrtm@bstu.by

Address for correspondence

Verameichyk Andrei I.
Brest State Technical University
267, Moskovskaya str.,
224017, Brest, Republic of Belarus
Tel.: +375 162 32-17-05
vai_mrtm@bstu.by

They compensate for axial movements, and also transmit torque at constant or variable angles between the connected units. During operation, the cardan transmission must function satisfactorily during the established service life, i. e., meet all the requirements arising from the peculiarities of its use. Therefore, the problem of improving cardan gears, increasing their reliability and ergonomicity on the basis of new design solutions optimized for dynamic parameters, materials used, manufacturing, assembly and operation technologies is relevant for modern technology. The paper presents a systematic approach to the creation of a new generation of cardan gears based on research in the field of operating conditions, materials science, materials technology, optimal design. It is shown that according to the results of the research, a new series of gimbal gears with improved technical characteristics has been created.

Keywords: cardan transmission, hinge, resource, wear, wear resistance, failure, destruction, wear factors, tribosystem, durability

For citation: Kostukovich G. A., Poprykailo A. V., Auchynnikau Y. V., Khvisevich V. M., Chekan N. M., Verameichyk A. I. (2023) Methods for Creating Designs of Cardan Gears of Increased Resource for Land Vehicles and Agricultural Machinery. *Science and Technique*. 22 (2), 119–126. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-119-126> (in Russian)

Введение

Приводные валы с универсальными шарнирами – карданные передачи – являются неотъемлемой частью подавляющего большинства современных машин и механизмов, в том числе транспортной техники: автомобильной, тракторной, железнодорожной и т. д. [1–6]. Оптимальный выбор конструкции передачи, а также рациональная компоновка приводных валов в значительной степени определяют технико-экономические и эксплуатационные характеристики машин и механизмов различного функционального назначения. Так, например, эффективность эксплуатации автомобильных трансмиссий в немалой степени зависит от параметров трансмиссионных валов. Их характеристики влияют на уровень вибрации, шума, надежность трансмиссии, устойчивость движения и маневренность автомобиля.

Карданная передача, обладая определенной массой, моментом инерции, специфической структурой и кинематикой шарниров, подвижностью шлицевого соединения и неизбежной несоосностью отдельных элементов, вызванной конструкторскими зазорами и технологическими допусками, представляет собой мощный источник интегрирования крутильных и изгибных колебаний, ощущаемых субъективно как вибрации и воздействующих как на собственные узлы передачи, так и на конструктивно связанные с ней механизмы автомобиля. Отказы отдельных узлов карданной передачи при наличии существенного дисбаланса часто становятся причиной преждевременного выхода из строя сопряженных с ней агрегатов автомобиля (например, редукторов ведущих мостов и коробок передач). Повышенная металлоемкость, виброактивность, недостаточная надеж-

ность отдельных элементов или узлов, большие осевые силы, возникающие в шлицевом соединении карданного вала, являются существенными недостатками многих конструкций карданных передач, препятствующими их промышленному применению. Поэтому проблема совершенствования конструкций карданных передач, повышения их надежности и эргономичности на базе применения новых конструкторских решений, оптимизированных по динамическим параметрам, применяемым материалам, технологиям изготовления, сборки и эксплуатации, актуальна для современной техники.

Важным аспектом проблемы является комплексное сочетание эффективных методов повышения технического ресурса карданной передачи с учетом экономических особенностей развивающегося рынка автотракторной и специальной техники и технологического оборудования в странах СНГ и мировых тенденций его развития.

Основная часть

Анализ результатов эксплуатационных испытаний транспортных средств при пробеге, близких к расчетному ресурсу, свидетельствует о том, что при соблюдении рекомендаций по техническому обслуживанию основной причиной отказов является износ трущихся деталей. Установлено, что до 45 % отказов двигателя, 83 % – сцепления, 98 % – карданной передачи, 78 % – заднего моста, 56 % – переднего моста и 79 % отказов рулевого управления обусловлены изнашиванием ограниченного числа деталей, входящих в их конструкцию [7, 8]. В связи с этим общая задача повышения технического ресурса автомобиля в большинстве

случаев связана с повышением износостойкости отдельных деталей, лимитирующих ресурс узлов, систем и автомобиля в совокупности.

Решение проблемы повышения ресурса машин и механизмов может быть обеспечено конструктивными, материаловедческими, техническими и эксплуатационными методами. Выбор метода решения в большинстве случаев субъективен и основан на сложившихся на конкретном предприятии объективных предпосылках создания конструкции с заданным ресурсом, включающих существующий опыт разработчиков, наличие высокоэффективного технологического оборудования, состояния системы контроля качества и др. В ряде случаев сложившаяся система хозяйствования и объективные экономические факторы развития государства на первый план выдвигают снижение стоимостных показателей выпускаемой техники без соответствующего обеспечения ресурса и надежности. На практике это приводит к широкому применению конструкторско-технологических решений, в которых не в полной мере реализованы подходы обеспечения оптимальных показателей износостойкости. Оптимальный подход к созданию современной техники с повышенными эксплуатационными характеристиками базируется на учете совокупных удельных расходов (материальных, энергетических, временных и др.) на изготовление, эксплуатацию, регенерацию и рециклинг. В разнообразии технических решений можно выделить важнейшие узлы карданной передачи, свойственные для всех механизмов подобного типа, – шлицевое соединение с возможностью осевого перемещения, универсальные шарниры и трубчатые валы [1–5]. Каждый узел карданной передачи имеет свое функциональное назначение, однако работоспособность и долговечность конструкции в целом зависит от эксплуатационных характеристик всей совокупности. Оптимальная по конструкторскому решению и использованным материалам карданная передача должна удовлетворительно функционировать в течение всего срока службы, обусловленного техническими условиями. Она должна иметь прочность и жесткость на скручивание, обеспечивающую передачу крутящего момента без разрушения конструкции. Универсальные шарниры имеют определенное расположение подшипников, при котором передача крутящего момента осуще-

ствляется при заданных скоростях и углах в условиях воздействия разнообразных эксплуатационных факторов. Шлицевые соединения вала, выступающие в качестве средства осевой компенсации перемещения, обеспечивают заданную реакцию передачи на условия движения транспортного средства или агрегата.

Габариты карданной передачи должны обладать оптимальными пропорциями для снижения неблагоприятного действия динамических нагрузок, возникающих в результате действия инерционных сил и вибраций. Таким образом, специфической особенностью карданных передач как триботехнических систем является необходимость системного учета всего многообразия эксплуатационных факторов при разработке оптимальной конструкции с заданными параметрами долговечности. Исследование шарнирных узлов и шлицевых соединений карданных передач различных машин и механизмов, эксплуатируемых в современной автотракторной и сельскохозяйственной технике, позволило установить характерные особенности их изнашивания. Превалирующим видом изнашивания при соблюдении требований к эксплуатации карданных передач является коррозивно-механический, обусловленный характерным для данной трибосистемы сочетанием эксплуатационных факторов: наличием высоких контактных напряжений, знакопеременным характером движения отдельных частей конструкции, воздействием вибраций, ударных нагрузок, абразивных частиц и коррозионно-активных внешних сред. Поверхности трения шлицевого соединения имеют вид, характерный для усталостных процессов, сопровождаемых абразивным и коррозионным воздействием эксплуатационной среды (влаги, растворов солей, абразивных частиц). Состав смазки, используемой в конструкциях карданных валов, после эксплуатации в дорожных условиях качественно отличается от исходного наличием абразивных частиц (преимущественно, кварца), частиц изнашивания контактирующих материалов (оксидов железа, частиц металла), оксидных и органических соединений, металлосодержащих органических соединений. На поверхностях трения отчетливо заметны следы пластического деформирования микронеровностей и воздействия абразивных частиц. Это свидетельствует о протекании в зоне фрик-

ционного воздействия шлицевого соединения комплекса физико-химических процессов, обуславливающих коррозионно-механическое изнашивание трибосопряжения.

Специфический характер изнашивания наблюдается и для другого важнейшего элемента приводного вала – карданного шарнира. Детали этого узла подвержены двум основным видам отказов: внезапным и постоянно развивающимся [9–11]. Внезапные отказы, связанные с механическим разрушением крестовины, обусловлены преимущественно нарушением рекомендуемых режимов эксплуатации. Накопление усталостных явлений происходит в установившихся режимах и усиливается вследствие наложения высокочастотных крутильных колебаний трансмиссии. Последние вызваны крутильными возмущениями от внешних воздействий, дисбалансом карданного вала, параметрическими колебаниями зубчатых колес, неравномерностью вращения валов вследствие изменения углов наклона карданных передач, крутильными колебаниями двигателя. Низкочастотные колебания нагрузок возникают при трогании автомобиля, переключении передач, воздействии неровностей дороги. Внезапные отказы шипов крестовины происходят из-за резких перегрузок и чаще всего наблюдаются при сочетании значительного крутящего момента и максимального угла излома шарнира. Обычно поломки обусловлены ошибкой при выборе типоразмера, конфигурации и материала крестовины, ошибкой в выборе технологии механической и упрочняющей обработки, нарушением технологии изготовления, сборки и эксплуатации шарнира.

К постепенно развивающимся видам отказа универсального шарнира следует отнести «ложное» бринеллирование, абразивный износ и усталостное выкрашивание рабочих поверхностей шипов крестовины. Ложное бринеллирование заключается в появлении характерных канавок на шипах крестовины в зоне ее контакта с телами качения подшипника с близкими к ним размерами. Основной причиной этого вида изнашивания является неравномерное распределение действующих нагрузок по длине игл при их сдвиге относительно оси рабочих поверхностей шипов крестовины и стаканов подшипников. Обычно он проявляется при недостаточной жесткости вилок карданных шар-

ниров, низкой твердости шипов крестовины, недостаточном количестве и качестве смазочного материала, плохой герметичности соединения и нарушении рекомендуемых условий эксплуатации.

Важную роль в проявлении ложного бринеллирования играют трибохимические превращения в зоне контакта, приводящие к окислению и деструкции смазки и взаимодействию активных продуктов с приповерхностными слоями шипа. Это приводит к изменению состава контактирующего слоя и снижению его устойчивости к действию динамических и контактных нагрузок. Недостаточно эффективное уплотнение обуславливает попадание в контактную зону абразивных частиц, инициирующих коррозионно-механическое разрушение поверхностей трения. Продукты трибохимических превращений, обладающие свойствами поверхностно-активных веществ (ПАВ), катализируют усталостные явления, приводящие к выкрашиванию микроучастков поверхностей контакта, препятствующие нормальному функционированию трибосопряжения. Таким образом, трибохимические процессы, протекающие при эксплуатации основных узлов передачи, обуславливают преимущественно коррозионно-механический износ контактирующих деталей при соблюдении рекомендованных режимов эксплуатации. Основные триботехнические явления в шлицевом соединении карданной передачи рассмотрены в [12, 13] на примере модельной системы Сталь 40Х – Сталь 40Х. Параметры шероховатости поверхности контактирующих тел по показателю $Ra = 0,8–1,2$ мкм и твердости $HRC = 42–45$ ед. соответствовали аналогичным показателям реальных карданных передач, применяемых в конструкции грузовых автомобилей типа МАЗ и КамАЗ.

Системный подход к рассмотрению процессов модельной системы позволил установить закономерности ее коррозионно-механического изнашивания. Обнаружено существование циклических процессов, катализирующих и ингибирующих износ, аналогичных приведенным в работе [10]. Так, разрушение микронеровностей и приповерхностного слоя контактирующих материалов вследствие усталостных явлений в зоне фрикционного контакта приводит к образованию частиц изнашивания и ювенильных поверхностей в активном состоянии.

На активных поверхностях адсорбируются низкомолекулярные (вода, водород и др.) и высокомолекулярные (продукты трибоккрекинга и трибополимеризации смазки) продукты трибохимических реакций, активированных фрикционным взаимодействием, контактными температурами и каталитическим действием поверхностных соединений металлического контртела. В результате инициируются процессы разрушения поверхностного слоя контактирующих материалов под действием ПАВ, водородного охрупчивания и изменения равновесной шероховатости поверхности контакта. Данные процессы катализируют коррозионно-механическое изнашивание трибосистемы. Другой цикл неблагоприятных трибохимических реакций формируется в результате воздействия контактных температур, инициирующих трибоккрекинг компонентов пластичной смазки на основе нефтяных масел. Фрикционное воздействие в сочетании с каталитическим воздействием оксидов железа и ювенильных поверхностей, образующихся при усталостном отделении частиц износа, приводит к окислению смазочной основы и образованию кислородсодержащих продуктов. Данные продукты способны к взаимодействию с оксидами на поверхности контактирующих материалов, что вызывает их коррозионное повреждение и интенсифицирует механический износ. Циклы трибохимических реакций, приводящих к изнашиванию, можно выделить и для других, составляющих модельной трибосистемы, обусловленных процессами пластического деформирования и микросхватывания, микрорезания абразивными частицами, попадающими извне и образующимися в результате выкрашивания зерен цементита в поверхностном слое, а также коррозионным воздействием внешней окружающей среды. В трибосистеме возможно и формирование благоприятных циклов трибохимических реакций, снижающих ее суммарный износ. Так, образование металлсодержащих соединений способствует повышению нагрузочной способности смазочного разделительного слоя, предотвращающего непосредственный контакт микронеровностей, и дезактивирует ПАВ, образующиеся в результате трибоккрекинга компонентов смазочной среды. Разрушение абразивных частиц и образование юве-

нильных поверхностей обуславливает адсорбцию и дезактивацию продуктов трибоккрекинга смазок, обладающих свойствами ПАВ и ускоряющих износ трибосистемы.

Проведенный системный анализ трибохимических аспектов фрикционного взаимодействия модельной системы, адекватной реальным карданным передачам, позволяет наметить некоторые направления повышения технических характеристик карданных передач, основанные на конструктивных, материаловедческих и технологических аспектах.

Здесь кроме рационального проектирования механизмов и их элементов для повышения эксплуатационного ресурса работы следует применить разработанную технологию осаждения на рабочие поверхности деталей тонких износостойких пленок катодно-дуговым методом.

Благодаря комплексному подходу и применению отдельных узлов, удовлетворяющих требованиям ISO 12667 “Commercial vehicles and buses; cross-tooth propellers haft flanges, type T” (Транспорт дорожный для коммерческих перевозок и автобусы. Фланцы карданного вала с крестообразно расположенными зубьями, тип T) [14] и ISO 8667 “Commercial vehicles and buses; cross-tooth gearbox flanges; type T” (Транспорт дорожный для коммерческих перевозок и автобусы. Фланцы коробки передач с крестообразно расположенными зубьями, тип T) [15] созданы конструкции карданных валов, не уступающие лучшим мировым образцам по характеристикам ресурса и эргономичности. Совокупность конструкторских, материаловедческих, технологических и организационных мероприятий обусловила создание карданных валов нового поколения с повышенными эксплуатационными характеристиками. Новые конструкции карданных валов наземного транспорта, сельскохозяйственного и технологического оборудования обеспечивают надежную эксплуатацию легковых и грузовых автомобилей, тракторов, навесного оборудования, городского и железнодорожного транспорта без дополнительного обслуживания. Сравнительные технические характеристики серийных и разработанных карданных передач серии «Белкард-2000» представлены в табл. 1.

Технические характеристики карданных передач серии «Белкард-2000»

Technical characteristics of gimbal gears of the «Belcard-2000» series

Тип карданной передачи	Показатель технической характеристики							
	G	M_k	$M_{кр}$	$d \times S$	Z	$D_{ост}$	n	n_6
Серийные карданные валы	40–49	12500	18000	94×4	0,16–0,20	245–284	2800–3420	1300–2200
Перспективные карданные валы серии «Белкард-2000»	39,5–48	12500	18000	94×4	0,06	120–145	2800–3420	>2200

Обозначения: G – диапазон массы вала, кг; M_k – крутящий момент без остаточной деформации вала, Н·м; $M_{кр}$ – крутящий момент без разрушения деталей вала, Н·м; $d \times S$ – внутренний диаметр трубы × толщина стенки трубы, мм; Z – осевой зазор вдоль шипов крестовины, мм; $D_{ост}$ – остаточный дисбаланс вала в любом положении, г·см; n – максимальная частота вращения вала в трансмиссии автомобиля, об/мин; n_6 – частота вращения вала при балансировке, об/мин.

Для повышения ресурса работы рабочих узлов и деталей карданных передач разработаны высокоэффективные методы упрочнения рабочих поверхностей крестовин шарниров карданных передач с использованием метода поверхностной плазменной закалки и нанесения тонких износостойких покрытий [16–18].

Использованные смазочные материалы нового поколения на основе минеральных и синтетических масел содержат пакеты многофункциональных присадок, подавляющих коррозионно-механический износ трибосопряжения и обеспечивающих минимальные потери на трение при поступательном и реверсивном движении [19].

Разработаны программные средства компьютерного моделирования и расчета динамических систем, которые позволяют осуществлять оптимизацию конструктивных элементов и мо-

дельные испытания их в условиях воздействия различных сочетаний эксплуатационных факторов [20].

Созданы промышленные мощности по выпуску более чем 20 модификаций карданных передач и универсальных шарниров с техническими характеристиками, соответствующими лучшим мировым аналогам.

Совершенствование транспортных средств, сельскохозяйственной техники, энергетических установок, увеличение их мощности, эксплуатационного ресурса, требований по надежности и безопасности использования обуславливают необходимость разработки новых модификаций основных узлов и агрегатов, в том числе приводных валов. Технические показатели по конструкциям карданных валов с разработанными материалами и технологиями представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические показатели по конструкциям карданных передач с разработанными материалами и технологиями

Technical indicators for gimbal gear designs with developed materials and technologies

Технико-экономический показатель	Единица измерения	Серийная конструкция карданной передачи	Конструкция карданной передачи серии «Белкард-2000»
Передаваемый крутящий момент	Н·м	12500	12500
Масса карданной передачи	кг	40–49	39–48
Осевой зазор в шарнирах	мм	0,16–0,20	0,06 шах
Осадочный дисбаланс	г·см	245–280	120–145
Присоединительные размеры		ГОСТ Р 52923	ISO 12667
Динамическая грузоподъемность подшипников шарнира	Н	59 000	66 000
Шлицевые соединения		Прямобочное, ГОСТ 1139. Способ получения – методом фрезерования и шлифовки. Термообработка: улучшение, поверхностная закалка ТВЧ	Эвольвентное, ГОСТ 6033. Полимерное конструкционное покрытие. Способ получения – методом холодного пластического деформирования (накатка). Термообработка не требуется
Усилие перемещения шлицевого соединения	Н	200	120
Уплотнение подвижного шлицевого соединения		Резиновая смесь 7В-14-1 ТУ 38.005.204–84	Полимерные композиционные материалы ТУ ВУ 7000 69297.001–2005
Эксплуатационный ресурс	км пробега	150000–200000	>500000

ВЫВОДЫ

1. Современные машиностроительные материалы на основе полимеров, керамики, металлов, изменяющие свои параметры в зависимости от условий эксплуатации, позволяют реализовать высокие удельные характеристики прочности, износостойкости, стойкости к воздействию неблагоприятных эксплуатационных факторов различных деталей и узлов карданных передач нового поколения. Все большее применение в практическом машиностроении получают наноматериалы, содержащие функциональные низкоразмерные компоненты, увеличивающие физико-механические, теплофизические, триботехнические и другие служебные характеристики деталей и узлов.

2. Совокупность современных научно-технических разработок в области материаловедения и технологии машиностроения является прочным фундаментом для создания новых конструкций карданных передач, полностью адаптированных к требованиям совершенствующегося машиностроения. По результатам проведенных исследований разработаны и созданы конструкции карданных валов с высоким ресурсом работы. Совокупность конструкторских, материаловедческих, технологических и организационных мероприятий позволила получить конструкции карданных валов с повышенными эксплуатационными характеристиками, которые обеспечивают надежную эксплуатацию автомобилей, тракторов, навесного оборудования, городского и железнодорожного транспорта без дополнительного обслуживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А. Х. Беркер [и др.]. Л.: Машиностроение, 1984. 464 с.
2. Малоховский, Я. Э. Карданные передачи / Я. Э. Малоховский, Л. А. Лапин, Н. К. Веденеев. М.: Машгиз, 1962. 156 с.
3. Карданные передачи грузовых автомобилей. Проблемы и решения / С. Н. Иванов [и др.] // Автомобильная промышленность. 1992. № 11. С 35–37.
4. Иванов, С. Н. Карданные передачи трансмиссий. Перспективы проблемы / С. Н. Иванов, В. А. Савельев, Н. П. Кочешков // Автомобильная промышленность: 1988. № 12. С. 40–43.
5. Иванов, С. Н. Трансмиссионные валы нового поколения / С. Н. Иванов // Автомобильная промышленность. 1998. № 11. С. 25–28.
6. Трикозюк, В. А. Надежность автомобиля / В. А. Трикозюк. М.: Транспорт, 1980. 88 с.
7. Лавринович, М. Ф. Анализ долговечности деталей автомобилей семейства МАЗ и технические методы ее повышения / М. Ф. Лавринович, М. М. Шустерняк. М.: НИИНавтопром. 1981. 56 с.
8. Заславский, О. Я. Системный подход как метод исследования долговечности карданной передачи / О. Я. Заславский // Автомобильная промышленность. 1981. № 11. С. 21–24.
9. Ротенберг, Р. В. Системный подход к проблеме надежности и вопросы ее обеспечения / Р. В. Ротенберг. М.: Знание, 1981. 341 с.
10. Кравченко, В. И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк; под ред. В.А. Струка. Минск: Тэхналогія, 2006. 409 с.
11. Шарнирная передача привода колеса автотранспортного средства: пат. РФ № 2188134 / В. П. Лобозов, С. И. Никитин, К. З. Шепеляковский, А. А. Кузнецов, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, М. М. Семеняко, А. М. Гагасов, Г. А. Достанко. Оpubл. 09.08.2001.
12. Карданный вал наземных транспортных средств: пат. РФ № 2212345 / В. А. Дроздов, Г. А. Костюкович, В. И. Кравченко. Оpubл. 01.04.2002.
13. Карданный вал наземных транспортных средств: пат. РБ № 4418 / В. А. Дроздов, Г. А. Костюкович, В. И. Кравченко. Оpubл. 05.01.1999.
14. Commercial Vehicles and Buses – Cross-Tooth Propeller Shaft Flanges, Type T: ISO 12667:1993 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.iso.org/standard/19694.html>.
15. Commercial Vehicles and Buses – Cross-Tooth Gearbox Flanges, Type T: ISO 8667:1986 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.iso.org/standard/16054.html>.
16. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: международ. сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т транспорта. Гомель, 2008. Вып. 2. С. 6–12.
17. Чекан, Н. М. Азотирование и нанесение особо твердых композиционных покрытий на поверхность инструментальных сталей в едином технологическом цикле / Н. М. Чекан, И. П. Акула, А. Н. Горельчик // 60 Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности»: материалы конференции, Витебск, 14–18 мая 2018 года / УО «ВГТУ», ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси». Витебск, 2018. С. 176–180.
18. Овчинников, Е. В. Структура электроискровых композиционных покрытий на металлической матрице / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, В. В. Михайлов, Н. Н. Казак // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. 2021. № 1. С. 49–53. <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-124-1-49-53>.
19. Овчинников, Е. В. Смазочные материалы на основе полярных и неполярных жидкостей, модифицированных гибридными углеродными наноматериалами / Е. В. Овчинников, В. М. Хвисевич, Н. М. Чекан,

- А. И. Веремейчик, Е. И. Эйсымонт, Г. А. Костоюкович // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. 2021. № 2. С. 58–62.
20. Веремейчик, А. И. Моделирование пробивки отверстия цилиндрическим пуансоном / А. И. Веремейчик, С. Р. Онысько, В. М. Хвисевич, А. А. Сосновский // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. межд. науч.-техн. конф., Брест, посв. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: С. Р. Онысько [и др.]. Брест: БрГТУ, 2021. С. 107–111.

Поступила 27.10.2022

Подписана в печать 31.01.2023

Опубликована онлайн 31.03.2023

REFERENCES

- Berker A. X., Vagner I. P., Vebster H. V., Dodzh D. X., Zhimanskii L. V., Zeigler S. M., Koinis Dzh., Kuni S. I., Laions D. M., Miller F. F., Neidzhel F. S., Pauers R. V., Troyanovskii T. S., Kholzinger D. V. (1984) *Design of Universal Joints and Drive Shafts*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 464 (in Russian).
- Malokhovskiy Ya. E., Lapin L. A., Vedeneev N. K. (1962) *Cardan Gears*. Moscow, Mashgiz Publ. 156 (in Russian).
- Ivanov S. N., Kozadaev A. I., Pivovarov B. I., Sokruto I. V. (1992) Truck Drive Lines. Problems and Solutions. *Avtomobilnaya Promyshlennost* [Automotive Industry], (11), 35–37 (in Russian).
- Ivanov S. N., Saveliev V. A., Kocheshkov N. P. (1988) Transmission Drivelines. Perspectives of the Problem. *Avtomobilnaya Promyshlennost* [Automotive Industry], (12), 40–43 (in Russian).
- Ivanov S. N. (1998) New Generation Transmission Shafts. *Avtomobilnaya Promyshlennost* [Automotive Industry], (11), 25–28 (in Russian).
- Trikozuyuk V. A. (1980) *Vehicle Reliability*. Moscow, Transport Publ. 88 (in Russian).
- Lavrinnovich M. F., Shusterniyak M. M. (1981) Analysis of Parts Durability of MAZ Cars Family and Technical Methods for Improving it. Moscow, Research Institute of Technology of the Automotive Industry. 56 (in Russian).
- Zaslavsky O. Ya. (1981) Systematic Approach as Method for Studying Durability of Driveline. *Avtomobilnaya Promyshlennost* [Automotive Industry], (11), 21–24 (in Russian).
- Rotenberg R. V. (1981) *Systematic Approach to the Problem of Reliability and Issues of its Provision*. Moscow, Znanie Publ. 341 (in Russian).
- Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Struk V. A. (2006) *Cardan Gears: Designs, Materials, Application*. Minsk, Tekhnologiya Publ. 409 (in Russian).
- Lobozov V. P., Nikitin S. I., Shepelyakovskiy K. Z., Kuznetsov A. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Semenyako M. M., Gagasov A. M., Dostanko G. A. (2021) *Articulated Transmission of the Wheel Drive of a Motor Vehicle*. Patent Russian Federation No 2188134 (in Russian).
- Drozdov V. A., Kostyukovich G. A., Kravchenko V. I. (2002) *Cardan Shaft of Ground Vehicles*. Patent Russian Federation No 2212345 (in Russian).
- Drozdov V. A., Kostyukovich G. A., Kravchenko V. I. (1999) *Cardan Shaft of Ground Vehicles*. Patent Republic of Belarus No 4418 (in Russian).
- ISO 12667:1993 Commercial Vehicles and Buses – Cross-Tooth Propeller Shaft Flanges, Type T. Available at: <https://www.iso.org/standard/19694.html>.
- ISO 8667:1986 Commercial Vehicles and Buses – Cross-Tooth Gearbox Flanges, Type T. Available at: <https://www.iso.org/standard/16054.html>.
- Veremeychik A. I., Sazonov M. I., Khvisevich V. M. (2008) Plasma Technologies as One of the Main Technologies for Improving the Performance Properties of Metal Products. *Mekhanika. Nauchnye Issledovaniya i Uchebno-Metodicheskie Razrabotki: Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr. Vyp. 2* [Mechanics. Scientific Research and Educational and Methodological Developments: International Collection of Scientific Papers. Iss. 2]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 6–12 (in Russian).
- Chekan N. M., Akula I. P., Gorelchik A. N. (2018) Nitriding and Deposition of Extra Hard Composite Coatings on the Surface of Tool Steels in a Single Technological Cycle. *60 Mezhdunarodnaya Nauchnaya Konferentsiya "Aktual'nye Problemy Prochnosti": Materialy Konferentsii, Vitebsk, 14–18 Maya 2018 goda* [60th International Scientific Conference "Actual Strength Issues": Proceedings of the Conference, Vitebsk, May 14–18, 2018]. Vitebsk, 176–180 (in Russian).
- Ovchinnikov E. V., Chekan N. M., Khvisevich V. M., Veremeichyk A. I., Mikhaylov V. V., Kazak N. N. (2021) Structure of Electrospark Nanocomposite Coatings on a Metal Matrix. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Vestnik of Brest State Technical University*, (1), 49–53. <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-124-1-49-53> (in Russian).
- Ovchinnikov E. V., Khvisevich V. M., Chekan N. M., Veremeichyk A. I., Eysmont E. I., Kostukovich G. A. (2021) Lubricants Based on Polar and Non-Polar Liquids Modified with Hybrid Carbon Nanomaterials. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Vestnik of Brest State Technical University*, (2), 58–62. <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-125-2-58-62> (in Russian).
- Veremeichyk A. I., Onysko S. R., Khvisevich V. M., Sosnovskiy A. A. (2021) Simulation of Hole Punching with a Cylindrical Punch. *Novye Tekhnologii i Materialy, Avtomatizatsiya Proizvodstva: Sb. St. Mezhd. Nauch.-Tekhn. Konf., Brest, Posv. 55-letiyu Brest. Gos. Tekhn. Un-ta* [New Technologies and Materials, Production Automation: Collection of Papers of International Scientific and Technical Conference, Brest, Conference Dedicated to 55th Anniversary of Brest State Technical University]. Brest, Brest State Technical University, 107–111 (in Russian).

Received: 27.10.2022

Accepted: 31.01.2023

Published online: 31.03.2023