



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 621.833

С. П. РУДЕНКО, канд. техн. наук
ведущий научный сотрудник¹
E-mail: sprud.47@mail.ru

С. Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.
генеральный директор¹
E-mail: p-s-n@tut.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 14.05.2018.

ТРЕБОВАНИЯ К ЗУБЧАТЫМ КОЛЕСАМ ТРАНСМИССИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Приведены технические требования к геометрии, конструкции и технологии изготовления зубчатых колес трансмиссий электромобилей. Показано, что тип передачи определяется не только конструктивными требованиями: кинематической схемой передачи, передаваемой мощностью, скоростями работы, ресурсом, надежностью и т. д., но и технологическими с учетом применяющегося зубообрабатывающего оборудования. Особое внимание отведено обоснованному выбору марки экономно-легированных сталей, требованиям их металлургического качества в условиях поставки.

Ключевые слова: зубчатые колеса, трансмиссии электромобилей, технические требования, экономно-легированные стали, металлургическое качество

Введение. Зубчатые колеса трансмиссий современных мобильных машин подвержены высоким силовым, динамическим и температурным нагрузкам. В конструктивном и технологическом отношении они являются одними из наиболее сложных деталей трансмиссий. Обеспечение качества их изготовления, надежности и ресурса является актуальной задачей при разработке и производстве новых образцов автомобильной техники, в том числе и электромобилей, которые в последнее время становятся все более востребованными у потребителя.

Назначение зубчатых колес трансмиссий электромобилей — передача энергии и преобразование крутящего момента и частоты вращения от тягового электродвигателя к ведущим колесам. Применение зубчатых передач для этих целей оправдано их надежностью, высоким КПД и компактностью. Особенности тягово-динамических характеристик электромобилей, зависящих от механических характеристик тягового электродвигателя, обуславливают особые технические требования к геометрии, конструкции и технологии

изготовления зубчатых колес трансмиссий, существенно отличающиеся от общего машиностроения. Одной из таких особенностей являются большие скорости вращения входного вала зубчатой передачи, достигающие 12–16 тыс. об/мин, при которых окружная скорость зубчатых колес может достигать 30 м/с. Особые технические требования к зубчатым передачам обуславливают применение совершенных конструктивных решений и передовых технологий, обеспечивающих ресурс и надежность работы трансмиссий электромобилей.

Выбор вида зацепления. Общим требованием к зубчатым передачам электромобилей является выбор вида зацепления. Широко известно, что несущая способность косозубых эвольвентных передач выше прямозубых на 30–40 %, а передач с зацеплением Новикова — на 50 %. К другим достоинствам косозубого зацепления относятся большая продолжительность зацепления и плавность работы, что уменьшает динамические нагрузки, шум и вибрации, снижается неравномерность распределения нагрузки по длине линии контакта зуба, имеется возможность изготовления

колес с минимальным числом зубьев без подрезания ножек зубьев ($z_{\min} = 14$). Главный недостаток косозубого зацепления — наличие осевых нагрузок, для восприятия которых должны применяться более мощные подшипниковые узлы, чем в прямозубом зацеплении. Увеличение площади трения зубьев вызывает дополнительные потери мощности на нагрев передачи. Следует учитывать также, что преимущества косозубого вида зацепления реализуются только при достаточно большой ширине зубчатого венца, обеспечивающей осевое перекрытие, равное целому числу [1]. В целом косозубые колеса применяются в механизмах, требующих передачи большого крутящего момента на высоких скоростях либо имеющих жесткие ограничения по шумности. Прямозубое зацепление характеризуется простотой изготовления и, как следствие, дешевизной производства; из-за меньшего пятна контакта снижается нагрев при работе, что позволяет менее требовательно относиться к системе смазки; отсутствие осевых нагрузок допускает применение более дешевых шариковых подшипников.

Особый вид зубчатых колес, применяемых в трансмиссиях, — это колеса с внутренними зубьями, которые используются в планетарных передачах. Главной особенностью этих передач является разделение передаваемой энергии на несколько потоков, число которых равно количеству промежуточных колес — сателлитов. Повышенная несущая способность внутреннего зацепления обусловлена тем, что вогнутые рабочие поверхности зубьев на колесе контактируют с выпуклыми на шестерне, что снижает контактные напряжения и улучшает условия смазки. Сочетание многопоточности и внутреннего зацепления обеспечивает малые габариты и массу планетарных передач в сравнении с обычными передачами. Это достоинство реализуется при достаточно равномерном распределении нагрузки между сателлитами за счет применения специальных уравнивающих устройств или за счет повышения точности изготовления всех элементов планетарной передачи [2].

Особенности геометрии зубчатых колес трансмиссий электромобилей непосредственно связаны с технологией их изготовления. В общем случае геометрия зубчатого колеса определяется числом зубьев z , модулем m , исходным контуром и его смещением. Модуль и число зубьев выбираются из ряда условий, основными из которых являются прочностные и компоновочные. В общем машиностроении ряды модулей и параметры исходного контура стандартизированы. Однако в высокоскоростных передачах стандартный исходный контур практически не применяется из-за необходимости поднутрения основания зубьев для свободного выхода шлифовального круга при их обработке. В зарубежной технике широко применяют зубчатые колеса с полностью шлифован-

ными впадинами, что предпочтительнее при использовании профильного шлифовального круга на современных шлифовальных станках.

Вид передачи определяется в первую очередь конструктивными требованиями к изделию: кинематической схемой передачи, передаваемой мощностью, скоростями работы, ресурсом, надежностью. На этапе проектирования должны быть удовлетворены и технологические требования с учетом применяющегося зубообрабатывающего оборудования. В настоящее время накоплен значительный опыт в проектировании, производстве и эксплуатации высокоскоростных зубчатых колес силовых передач [1]. Этот опыт показал, что технология производства напряженных высокоскоростных зубчатых колес повышенного ресурса должна обеспечивать:

- точность зубчатых колес по нормам плавности и контакта не менее 5-й степени по ГОСТ 1643-81 с фланкированием, а также профильной и продольной модификацией зубьев, рассчитываемых с учетом деформации зубьев под нагрузкой;
- отсутствие поверхностных дефектов после шлифования зубьев;
- оптимальную геометрию нешлифованного основания зубьев при шероховатости не более $R_a = 0,8$ мкм;
- требуемое качество химико-термической обработки в соответствии с ГОСТ 30634-99 и РТМ ОИМ 34–2010.

Точностные показатели. Главным требованием, предъявляемым к зубчатым передачам, является обеспечение надежности, основным эксплуатационным параметром которой является ресурс, определяемый заданным пробегом автомобиля без повреждений зубьев вследствие излома, сколов, выкрашивания, износа. Поэтому выбор точностных показателей должен осуществляться с учетом всех факторов, влияющих на эксплуатационные показатели зубчатых колес. Функционально точной является передача, у которой точностные показатели обеспечивают заданные эксплуатационные параметры. Нестационарность режима работы, а также особенности производства накладывают ограничения на степень достижения функциональной точности зубчатых передач трансмиссий. Назначение нормируемых точностных показателей должно осуществляться в каждом конкретном случае в зависимости от конструктивных особенностей передач трансмиссий, условий эксплуатации, технологических решений и возможностей производства. Фактически функциональная точность зубчатой передачи обеспечивается двумя путями: конструктивным и технологическим [1]. Конструктивные решения, обеспечивающие функциональную точность, — это модификация зубьев, разноконтурность, фланкирование, бочкообразность и другие решения. Технологические решения — комплекс мероприятий по выбору материала и рациональ-

ного построения технологии его обработки на базе высокоточного оборудования и инструмента. Эти два решения применяются одновременно с целью получения оптимального результата.

При назначении норм кинематической точности в первом приближении следует руководствоваться окружными скоростями зубчатых колес (таблица) [3]. Однако следует отметить, что согласно последним публикациям [1, 4] действующий в настоящее время ГОСТ 1643–81 не пригоден в современных условиях и не соответствует международному стандарту на точность зубчатых колес ISO 1328. В связи с этим при организации производства высокоскоростных передач с использованием зарубежного оборудования предлагается оформлять конструкторскую документацию на зубчатые передачи с дублированием контрольных комплексов в системах ГОСТ и ISO [4].

Разработка технологического процесса изготовления зубчатых колес начинается и ведется параллельно с разработкой конструкции зубчатой передачи. При этом определяющим является учет особенностей конкретного производства, на котором планируется изготавливать зубчатую передачу.

Технологические факторы. Важнейшим технологическим фактором, определяющим уровень долговечности зубчатых колес трансмиссий, является качество поверхностного слоя зубьев, формирующегося в результате химико-термического упрочнения и последующей финишной обработкой (шлифование, алмазное хонингование, дробеструйная обработка, поверхностное пластическое деформирование) рабочих поверхностей зубьев [5, 6]. Для высоконапряженных зубчатых колес качество поверхностно-упрочненного слоя зубьев должно удовлетворять требованиям повышенной сопротивляемости усталостному повреждению и разрушению в условиях действия высоких контактных и изгибных напряжений, сил трения и температур.

Наиболее важными характеристиками, определяющими технологию изготовления и работоспособность зубчатых колес, являются поверхностная твердость и ее распределение по упрочненному слою, эффективная толщина упрочненного слоя и его микроструктура. Совокупность этих характеристик определяет уровень несущей способности зубчатой передачи, сопро-

тивление контактной усталости (поверхностной и глубинной), знакопеременному изгибу и изнашиванию. Каждый из указанных критериев работоспособности зависит от воздействия на поверхностный слой комплекса металлургических и технологических факторов.

На качество поверхностного слоя зубьев оказывает влияние весь цикл технологического процесса изготовления, начиная от выбора материала и предварительной его термической обработки и заканчивая финишной обработкой [7]. Материал заготовки предопределяет многие выходные параметры качества зубчатого колеса через проявление факторов технологической наследственности, когда конечные показатели качества зубчатых колес оказываются наследственными от предыдущих операций. К таким показателям качества относятся: микроструктура, направление волокон, остаточные напряжения, шероховатость поверхностей, дефекты шлифования и другое. Поэтому выбор материала имеет важное значение в плане обеспечения критериев работоспособности высокоскоростных зубчатых передач.

Выбор марки стали. В автомобилестроении для зубчатых колес трансмиссий широко применяют дорогостоящие никельсодержащие марки конструкционных сталей. Однако, обладая комплексом высоких механических свойств, обеспечиваемых в широком диапазоне рабочих сечений деталей, никелевые стали имеют ряд существенных недостатков. В частности, стали с повышенным содержанием никеля типа 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА, 20Х2Н4А весьма нетехнологичны на всех стадиях термического передела и требуют применения специальных режимов термической и химико-термической обработки. Как правило, в диффузионных слоях таких сталей содержится повышенное количество остаточного аустенита, препятствующего стабильному получению высокой твердости и повышающего склонность к образованию трещин при шлифовании цементованных деталей, что является большой производственной проблемой [8].

Другой главный недостаток хромоникелевых сталей — низкая теплостойкость. В процессе длительной работы твердость цементованной поверхности стали 12Х2Н4А снижается при температуре нагрева свыше 170 °С [9]. Между тем увеличенные скорости и контактные нагрузки в зубчатых зацеплениях трансмиссий электромобилей могут привести к значительному увеличению их тепловой напряженности. Отмечается [1], что на поверхности зубьев из стали 12Х2Н4А в быстроходных передачах редуктора при температуре смазочного масла 110 °С зафиксированы структурные изменения, соответствующие локальным нагревам до 320 °С.

Для обеспечения устойчивости структуры цементованного слоя к повышенной рабочей температуре и кратковременным локальным тем-

Таблица — Рекомендации по назначению норм точности зубчатых передач в зависимости от окружной скорости зацепления

Степень точности по ГОСТ 1643-81	Окружные скорости колес, м/с, не более	
	прямозубые	косозубые
6	20	35
7, 7–6–6	15	25
8, 8–7–7	6	10

пературным всплескам применяют комплексно-легированные теплостойкие стали [1, 9], химический состав которых соответствует ГОСТ 20072-74, ТУ 14-1-2090 и ТУ 142143-2-71. В этих сталях уменьшено содержание никеля и введены карбидообразующие элементы (Cr, W, Mo, V, Nb). Данные стали обладают повышенной теплостойкостью (250–350 °С) и применяются преимущественно для зубчатых колес современных авиадвигателей. Химико-термическая обработка комплексно-легированных теплостойких сталей включает цементацию, высокий отпуск, закалку, обработку холодом и низкий отпуск.

Результаты исследований последних лет [10] показали, что для изготовления высоконапряженных зубчатых колес могут успешно применяться безникелевые или с небольшим содержанием никеля экономно-легированные стали при обеспечении требуемого качества упрочненных слоев. В данном случае под конструкционными экономно-легированными сталями понимаются стали, полностью обеспечивающие комплекс всех требуемых условиями эксплуатации физико-механических, технологических и иных свойств при минимальном их легировании, особенно дорогостоящими или дефицитными элементами.

Повышенные требования к эксплуатационным характеристикам зубчатых колес трансмиссий автомобильной техники обуславливают разработку новых эффективных марок сталей, обладающих повышенными механическими свойствами. Результаты исследований [8, 10] показали эффективность использования природно-мелкозернистых экономно-легированных сталей для высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий мобильных машин. Для обеспечения мелкозернистой структуры, повышения механических свойств и прокаливаемости применили микролегирование стали ниобием, величина добавки которого составляла 0,03–0,08 %, и бором в количестве 0,002–0,012 %. Полученный химический состав опытных плавок стали соответствует марке 20ХГНМБР [8, 11].

Преимущество ниобия перед другими сильными карбидообразующими элементами заключается в том, что выделяющиеся частицы карбида ниобия имеют более благоприятную морфологию для эффективного сдерживания роста зерен при нагреве. Результаты исследований показали, что по сравнению со сталью 20ХГНМ ГОСТ 4543-71 предел текучести опытной стали 20ХГНМБР увеличивается в 1,25 раза, ударная вязкость — в 2–2,3 раза [8].

Применение наследственно мелкозернистых сталей требует корректировки технологических процессов их термической и химико-термической обработок. Появляется возможность повышения температуры цементации (с 930 до 960 °С), исключения операций высокого отпуска и повторного нагрева под закалку при ХТО, проведения закалки

с температуры подстуживания после цементации. Внедрение таких мероприятий позволяет существенно сократить (на 20–30 %) время проведения ХТО и тем самым снизить затраты на изготовление деталей.

Создание нового подхода к разработке режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономно-легированных сталей, основанного на расчетных моделях сопротивления усталости и прокаливаемости диффузионных слоев материала зубчатых колес, а также на математическом моделировании процесса диффузии углерода в стали, позволила обеспечить заданный уровень эксплуатационных свойств высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин с учетом требований к градиенту величины микротвердости упрочненного слоя и кинетики изменения концентрации углерода в диффузионном слое. [12].

На примере экономно-легированной стали показана эффективность разработанных режимов химико-термической обработки и ее безусловное преимущество перед высоколегированной хромоникелевой сталью 20ХНЗА, широко применяемой в машиностроении.

Рассмотрим основные требования, которые необходимо предъявлять к экономно-легированной стали для зубчатых колес трансмиссий электромобилей. Одной из определяющих структурных характеристик сталей, влияющих на несущую способность напряженных зубчатых колес, является величина наследственного или действительного зерна. Размер наследственного зерна характеризует склонность стали к росту зерна при определенной температуре. Действительное зерно — это зерно, полученное в конкретных условиях нагрева в результате термической обработки детали. На механические и технологические свойства стали влияние оказывает только действительный размер зерна. Сталь с меньшим действительным зерном обладает более высокими пластическими свойствами, большей ударной вязкостью и пределом выносливости.

Для повышения ударной вязкости экономно-легированной стали, содержащей никель менее 1 %, сталь дополнительно легируется элементами, в малых добавках активно тормозящими рост зерна в определенных температурных интервалах нагрева: титаном, ванадием, танталом, ниобием и др. Преимуществом этих сталей является способность сохранения мелкозернистой структуры (номер зерна 10 по ГОСТ 5639-82) даже при повышенных температурах цементации (до 1000 °С) [13]. В этом случае ударная вязкость стали с ниобием (0,04 %), содержащей 0,65 % Ni, в 1,5 раза выше, чем стали с 2,75–3,15 % Ni и составляет $KCU = 1300 \text{ кДж/м}^2$ [14]. Наличие в данной стали ниобия способствует уменьшению величины зерна, устранению химической и структурной

неоднородности, разнотерности, повышению предела текучести и прочности, ударной вязкости и хладноустойчивости.

Следующим основным требованием к стали является содержание серы. Сера является вредной примесью и практически находится в виде сульфидов железа и марганца. Сульфиды являются основной причиной анизотропии, резко снижают пластичность и вязкость. Чем больше в стали серы, тем больше полосчатость, которая является одной из причин повышенных деформаций при ХТО, приводит к формированию неоднородной разнотерной микроструктуры цементованного слоя и понижению уровня прочностных свойств деталей. При содержании серы свыше 0,008 % значительно увеличивается анизотропия механических свойств стали. В этом случае значения ударной вязкости при поперечном расположении волокон снижаются по отношению к продольному в 6–8 раз [15]. Поэтому рекомендуется ограничивать содержание серы в экономно-легированной стали до 0,01 %.

Важнейшим фактором, характеризующим металлургическое качество стали и определяющим комплекс ее свойств, являются неметаллические включения, которые по химическому составу делятся на пластичные (сульфиды, силикаты) и хрупкие (оксиды, нитриды). Пластичные включения в результате горячей пластической деформации стали из-за своей вытянутости делают сталь анизотропной и являются более вредными. Поэтому пластичные сульфиды Са, Fe, Mn в большей степени снижают качество стали, чем непластичные оксиды (Al_2O_3 , SiO_2).

Сформулированные требования к содержанию серы определяют также и содержание в стали сульфидов. Регламентирование содержания серы не более 0,01 % относит сталь к особовысококачественной, которая может быть выплавлена только с использованием переплавов, обеспечивающих очистку сталей и от неметаллических включений. К их числу относят электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав. При внепечной обработке жидкой стали в ковше используются методы обработки синтетическим шлаком, продувки аргоном, вакуумной обработки и другие методы рафинирования стали. Эти способы производства сталей обеспечивают не только химическую чистоту сталей, но и микрооднородность как по составу, так и по ее свойствам. Таким образом, регламентированные требования к содержанию серы на уровне особовысококачественной стали обуславливают требуемую технологию ее производства и, следовательно, регламентированную чистоту по неметаллическим включениям.

Заключение. Особенностью работы зубчатых передач электромобилей являются большие скорости вращения входного вала, что обуславливает особые технические требования к геометрии, конструкции и технологии изготовления зубчатых колес, а так-

же применение совершенных конструктивных решений и передовых технологий, обеспечивающих ресурс и надежность работы трансмиссий.

Тип передачи определяется конструктивными требованиями к изделию: кинематической схемой передачи, передаваемой мощностью, скоростями работы, ресурсом, надежностью и т. д., однако на этапе проектирования должны быть удовлетворены и технологические требования с учетом применяющегося зубообрабатывающего оборудования.

Материал зубчатых колес, а также комплекс металлургических и технологических факторов предопределяют многие выходные параметры качества изделий. Результаты исследований позволяют осуществлять обоснованный выбор материала и назначать технические требования к поставке стали и качеству химико-термического упрочнения, принципиальным положением которых является применение особовысококачественных экономно-легированных сталей и стабилизация технологических режимов ресурсосберегающих технологических процессов химико-термической обработки в производственных условиях.

Список литературы

1. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев [и др.]. — М.: Высш. шк., 1996. — 494 с.
2. Кудрявцев, В.Н. Расчет и проектирование зубчатых редукторов / В.Н. Кудрявцев, И.С. Кузьмин, А.Л. Филипенков; под общей ред. В.Н. Кудрявцева. — СПб.: Политехника, 1993. — 448 с.
3. Тайц, Б.А. Точность и контроль зубчатых передач / Б.А. Тайц, Н.Н. Марков. — Л.: Машиностроение, 1978. — 226 с.
4. Антонюк, В.Е. Особенности проектирования и оценки нагруженности зубчатых колес планетарных передач / В.Е. Антонюк // Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В.Б. Альгин [и др.]; под общ. ред. В.Б. Альгина, В.Е. Старжинского. — Минск: Беларус. навука, 2017. — Гл. 4. — С. 137–162.
5. Зинченко, В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В.М. Зинченко. — М.: Из-во МГТУ им. Баумана, 2001. — 303 с.
6. Сусин, А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А.А. Сусин. — Минск: Беларус. навука, 1999. — 175 с.
7. Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 126 с.
8. Новая цементуемая сталь с регламентируемой прокаливаемостью для зубчатых колес трансмиссий / С.П. Руденко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013. — № 3. — С. 57–61.
9. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справ. / В.И. Алексеев [и др.]; под ред. Э.Б. Вулгакова. — М., 1981. — 374 с.
10. Руденко, С.П. Выбор марки стали для высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий / С.П. Руденко, А.А. Шипко, А.Л. Валько // Автомобил. пром-сть. — 2013. — № 8. — С. 33–36.
11. Низколегированная борсодержащая сталь для цементуемых деталей: пат. 025921 ЕА С22С 38/54 / С.П. Руденко, А.Л. Валько, А.А. Шипко [и др.]. — Опубл. 28.02.2017.
12. Руденко, С.П. Разработка режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономно легированной стали / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 2. — С. 34–38.

13. Високотемпературная вакуумная цементация — резерв по снижению энергоёмкости производства и улучшению качества зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / А.А. Шипко [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2016. — № 2. — С. 104–109.
14. Руденко, С.П. Структурные особенности экономнолегированной стали 20ХГНМБ после химико-термического упрочнения / С.П. Руденко, А.А. Шипко, А.Л. Валько // *Литье и металлургия*. — 2014. — № 2. — С. 86–90.
15. Руденко, С.П. Влияние содержания серы на анизотропию пластических свойств конструкционных сталей / С.П. Руденко, А.Л. Валько, В.Н. Парфенчик // *Сталь*. — 2018. — № 2. — С. 46–49.

RUDENKO Sergey P., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher¹

E-mail: sprud.47@mail.ru.

PODDUBKO Sergey N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Director General¹

E-mail: p-s-n@tut.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus.

Received 14 March 2018.

REQUIREMENTS TO TOOTHED GEARS OF TRANSMISSIONS OF ELECTRIC MOTOR CARS

Technical requirements of geometry, construction and manufacturing methods of toothed gears of transmissions of electric motor cars are given. It is shown, that the drive type is defined not only by design requirements: the kinematic scheme of the drive, transmitted power, velocities of operation, fatigue life, reliability, etc., but also by technological requirements taking into account applied gear machinery. The special attention is paid to the reasonable choice of a brand of the sparingly alloyed steels and to requirements of their metallurgical quality in conditions of deliveries.

Keywords: *toothed gears, transmissions of electric motor cars, technical requirements, sparingly alloyed steels, metallurgical quality*

References

- Eliseev Yu.S., Krymov V.V., Nezhurin I.L. *Proizvodstvo zubchatykh koles gazoturbinykh dvigateley* [Manufacture of toothed gears of gas-turbine engines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996. 494 p.
- Kudryavtsev V.N., Kuzmin I.S., Filipenkov A.L. *Raschet i projektirovanie zubchatykh reduktorov* [Calculation and design of gear reducers]. St. Petersburg, Politekhnika Publ., 1993. 448 p.
- Tayts B.A., Markov N.N. *Tochnost i kontrol zubchatykh peredach* [Precision and control of toothed gears]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978. 226 p.
- Algin V.B., e.a. *Zubchatye peredachi i transmissii v Belarusi: projektirovanie, tekhnologiya i otsenka svoystv* [Toothed gears and transmissions in Belarus: design, process engineering and estimate of properties]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 406 p.
- Zinchenko V.M. *Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoy obrabotki* [Surface engineering of toothed gears by methods of chemical heat treatment]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. Baumana Publ., 2001. 303 p.
- Susin A.A. *Khimiko-termicheskoe uprochnenie vysokonapryazhennykh detaley* [Chemical heat reinforcement of heavily stressed components]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1999. 175 p.
- Rudenko S.P., Valko A.L. *Kontaktynaya ustalost zubchatykh koles transmissiy energonasyshchennykh mashin* [Contact fatigue of transmissions toothed gears of high-energy machines]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 126 p.
- Rudenko S.P., Valko A.L., Dudetskaya L.R., Emelyanovich I.V. *Novaya tsementuemaya stal s reglamentiruемой prokalyvaemostyu dlya zubchatykh koles transmissiy* [New case-hardening steel with regulated hardenability for transmissions toothed gears]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2013, no. 3, pp. 57–61.
- Alekseev V.I., e.a. *Aviatsionnye zubchatye peredachi i reduktory: sprav.* [Aviation toothed gears and reducers: reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 374 p.
- Rudenko S.P., Shipko A.A., Valko A.L. *Vybor marki stali dlya vysokonapryazhennykh zubchatykh koles transmissiy* [Choosing a brand of steel for high-energy transmissions toothed gears]. *Avtomobilnaya promyshlennost* [Motor-car industry], 2013, no. 8, pp. 33–36.
- Rudenko S.P., Valko A.L., Shipko A.A. *Nizkolegirovannaya borsoderzhashchaya stal dlya tsementuemyykh detaley* [Low-alloyed boron-containing steel for carburizing details]. Patent EA, no. 025921, 2017.
- Rudenko S.P., Valko A.L. *Razrabotka rezhimov khimiko-termicheskoy obrabotki zubchatykh koles iz ekonomno legirovannoy stali* [Development of the regimes of chemical heat treatment of toothed gears from sparingly alloyed steel]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2017, no. 2, pp. 34–38.
- Shipko A.A., Rudenko S.P., Valko A.L., Chichin A.N. *Vysokotemperaturnaya vakuumnaya tsementatsiya — rezerv po snizheniyu energoemkosti proizvodstva i uluchsheniyu kachestva zubchatykh koles transmissiy energonasyshchennykh mashin* [High-temperature vacuum cementation — the reserve to reduce the energy intensity of manufacture and improve the quality of transmissions gearwheels of high-energy machines]. *Lite i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2016, no. 2, pp. 104–109.
- Rudenko S.P., Shipko A.A., Valko A.L., Chichin A.N. *Strukturnye osobennosti ekonomnolegirovannoy stali 20KhGNMB posle khimiko-termicheskogo uprochneniya* [Structural features sparingly alloyed steel 20KhGNMB after chemical heat treatment]. *Lite i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2014, no. 2, pp. 86–90.
- Rudenko S.P., Valko A.L., Parfenchik V.N. *Vliyaniye soderzhaniya sery na anizotropiyu plasticheskikh svoystv konstruktivnykh staley* [Influence of sulfur content on anisotropy of plastic properties of structural steels]. *Stal* [Steel], 2018, no. 2, pp. 46–49.