

УДК 669.18.33:621.78

П.А. ВИТЯЗЬ, д-р техн. наук, акад. НАН Беларуси
начальник отделения технологий машиностроения и металлургии¹

В.И. МОИСЕЕНКО, д-р техн. наук, проф.
главный научный сотрудник лаборатории проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов
большой и особо большой грузоподъемности¹

А.Г. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук
заведующий лабораторией проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой
и особо большой грузоподъемности¹

Д.Г. ТОМАШЕВСКИЙ
младший научный сотрудник¹

С.А. ШИШКО
заместитель главного конструктора²

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

²ОАО «БЕЛАЗ — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 27.04.2018.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 20ХНЗМА ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЦЕМЕНТИРУЕМЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В статье приведен анализ и дана оценка применимости наиболее известным маркам сталей, используемых для изготовления крупногабаритных цементированных зубчатых колес. Выявлено, что повышение твердости цементированной поверхности зуба с одновременным обеспечением и сохранением заданного его направления является комплексной и важнейшей задачей при создании цементированных зубчатых колес. Изучены особенности изменения размеров деталей в зависимости от степени их легирования никелем. Предложено использование нового материала — сталь 20ХНЗМА, — который позволяет повысить прочность, точность, надежность и ресурс крупногабаритных зубчатых колес. Особый интерес сталь 20ХНЗМА, как малодеформируемая при технологических переделах и в эксплуатации, представляет для крупногабаритных зубчатых колес редукторных систем большой мощности и для нешлифуемых зубчатых колес, в первую очередь — с круговым зубом. Изложенный материал статьи представляет интерес и может быть полезен для научных работников и инженерно-технических служб машиностроительной промышленности.

Ключевые слова: ресурс, прочность, надежность, зубчатое колесо, коробление, трансмиссия, легирование, цементация

Введение. Работоспособность зубчатых колес определяется их сопротивлением разрушению от циклических изгибающих и контактных нагрузок. В последнее время особое внимание уделяется увеличению сопротивления крупногабаритных зубчатых колес глубинному контактно-му разрушению [1].

Обеспечение прочности по указанным характеристикам у крупногабаритных цементированных колес достигается в первую очередь твердостью поверхности и сердцевины зубьев, толщиной и твердостью упрочненного слоя и его структурой, а также точностью зацепления.

Если оценки НДС зубчатых колес, базирующиеся на апробированных программных продуктах, позволяют сегодня производить проектные оценки нагруженности деталей с достаточно пол-

ным отражением их формы и действующих нагрузок, то используемые в производстве зубчатых колес материалы и технологии не всегда отвечают требованиям, обеспечивающим приемлемый срок службы и минимизацию массы указанных крупногабаритных деталей.

Исследования ОИМ НАН Беларуси [2] показывают, что у прямозубых колес редукторов мобильных машин большой единичной мощности для достижения ресурса деталей более 300 тыс. км пробега твердость поверхности зубьев (при их точности по отклонению направления не ниже 7-й степени по ГОСТ 1643-81) должна выдерживаться на уровне свыше 60 НРС. При отклонении контактной линии, характеризуемой допустимым по ГОСТ 1643-81 коэффициентом отклонения направления $F_{\beta} = 40$ мкм (8-я степень

точности), и твердости поверхности зубьев 58 HRC (что наиболее характерно при использовании сталей с содержанием никеля 3–3,5%) расчетный пробег составляет не более 100 тыс. км, что находит свое подтверждение в условиях эксплуатации.

Чем выше поверхностная твердость зубьев, тем выше влияние точности на расчетную долговечность. При твердости 58 HRC уменьшение погрешности F_β в два раза (с 40 до 20 мкм) приводит к повышению ресурса в 1,5 раза, а при твердости 62 HRC — почти в 4 раза.

В международном стандарте ISO 6336 поверхностная твердость также задается в зависимости от степени качества изготавливаемых шестерен: от 55 HRC у низкого класса, до 58–64 HRC у среднего и высокого классов. В случае изготовления шестерен высокого класса вся партия деталей подлежит контролю. С совершенствованием стандартов требования к поверхностной твердости колес повысились: при переходе от ISO 6336 1996 года к ISO 6336 2006 года допускаемая поверхностная твердость поднята с 57–62 HRC до 58–64 HRC.

Следует указать, что уровень поверхностной твердости более 60 HRC достижим, как правило, только для нешлифуемых колес, получение которых с максимально высокими уровнями точности, принятыми в машиностроении, проблематично.

Таким образом, повышение твердости цементированной поверхности зуба с одновременным обеспечением и сохранением заданного его направления в течение всего срока эксплуатации является комплексной и важнейшей задачей при создании цементированных зубчатых колес.

Наряду с вышеуказанными характеристиками зубьев для обеспечения их циклической изгибной прочности придается значение и другим параметрам шестерен. При твердости материала детали менее 31 HRC и более 45 HRC расчетные напряжения изгиба следует снижать не менее чем на 25%. Снижение расчетных напряжений на 25% рекомендовано и при использовании сталей, содержащих никель и хром менее 1% каждого из элементов [3, 4].

Исходя из изложенного, наиболее частым решением при выборе материала для крупногабаритных цементированных зубчатых колес является использование хромоникелевых сталей с количеством никеля до 3% с целью ограничения (не более 15%) остаточного аустенита в упрочненном слое зубьев. Такой уровень остаточного аустенита, к примеру, принят в авиастроении [5]. В нормативах ведущих шведских производителей сталей количество остаточного аустенита ограничивается величиной — 3% [6].

При содержании же никеля до 4% количество остаточного аустенита в упрочненном слое после цементации может достигать 40%. Впервые

показано [7], что на границах зерен указанных материалов даже после их отжига возникает аустенит до 3–5%, что и приводит к повышенному короблению зубьев при их нарезании и ХТО. Детали из указанных материалов, кроме того, что имеют более низкую твердость цементированных поверхностей зубьев, значительно подвержены повышенному короблению как на технологических переделах, так и в эксплуатации. Считается установленным, что коробление деталей из стали 20X2H4A при термической обработке почти в 2 раза больше, чем у деталей из стали 20XH3A [8]. Это приводит к заметному увеличению припусков на шлифование и, как следствие, к неравнопрочности упрочненного слоя вследствие снижения его глубины, твердости и несущей способности. Последнее особенно актуально с точки зрения обеспечения глубинной контактной прочности [1].

Если указанные погрешности очевидны, могут быть проконтролированы и устранены на стадии производства или учтены через коэффициент статистического распределения погрешностей контактной линии зуба a_β [3], то исследования коробления и его влияния на изменение направления зуба F_β , происходящее в процессе эксплуатации редукторов, ограничены, и рекомендации по его устранению и учету при проектировании зубчатых передач практически отсутствуют.

С использованием новой концепции формирования служебных свойств конструкционных сталей, основанной на управлении составом и структурой их приграничных объемов зерен [9], создана новая сталь 20XH3MA, легированная молибденом и модифицированная ванадием.

Принято считать [10], что основные преимущества молибдена заключаются в том, что он способствует закаливанию и прокаливаемости сталей. Это позволяет снижать содержание никеля в материале, устраняя недостатки, связанные с образованием остаточного аустенита. Но молибден часто специально используют и для изготовления нешлифуемых цементруемых зубчатых колес в первую очередь — крупногабаритных — для снижения количества троостита в наружном слое и повышения прочности [11]. Известно также, что присутствие в стали молибдена может заметно ухудшать обрабатываемость деталей особенно при наличии в стали ванадия и других тугоплавких элементов [10].

Новый запатентованный [12] конструкционный материал — сталь 20XH3MA — не имеет недостатков, приведенных выше и свойственных широко известным маркам сталей, используемых для изготовления цементированных зубчатых колес (20X2H4A, 20XH3A, 18XГН2МФБ), а прочностные характеристики новой стали выше, чем у данных материалов (таблица 1).

Сталь 18XГН2МФБА, рекомендованная ее создателями для изготовления зубчатых колес

Таблица 1 — Механические свойства сталей, используемых для изготовления крупногабаритных цементируемых зубчатых колес (общие данные)

№	Марка стали	Механические свойства					
		Предел прочности, σ_b , МПа	Предел текучести, σ_s , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, ψ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²	Твердость, HRC
1	20X2H4A	≥1270	≥1080	≥9	≥45	>78 при +20 °С	—
2	20ХНЗМА	1379	—	12	57	115 при +20 °С 111,3 при -40 °С 108,8 при -60 °С	$H_{сердц} = 40-41$, HRC $HV_{пов} = 780-810$, HV _{0,2}
3	18ХГН2МФБ	1340–1380	—	7,2–12	—	27,5–60	$H_{сердц} = 26-29$, HRC $HV_{пов} = 695$, HV _{0,2}

Примечание: Механические характеристики стали 20ХНЗМА после закалки с 820 °С.

со сложным профилем зубьев, не подлежащих шлифованию (содержание в стали никеля на уровне 2%), позволяет получать в деталях (при традиционных технологиях их изготовления «без обработки холодом») достаточно низкое содержание остаточного аустенита (до 10%). Однако твердость сердцевины зубьев шестерен с модулем более 10 мм не превышает 25–29 HRC, что на 20–25% ниже требований ГОСТ 21354-87 и потому неприемлемо для крупных деталей.

По прочностным свойствам новая сталь 20ХНЗМА соответствует стали SKF 235 шведской фирмы OVAKO — одного из основных мировых производителей цементируемых сталей, в том числе и для цементируемых крупногабаритных подшипников. Химический состав стали 20ХНЗМА представлен в таблице 2.

В настоящее время конструкционная сталь 20ХНЗМА используется на ОАО «БЕЛАЗ» для изготовления крупногабаритных зубчатых колес редукторных систем и нешлифуемых зубчатых колес, в том числе главных передач с круговым зубом.

Таблица 2 — Химический состав стали 20ХНЗМА

Название компонента	Соотношение, мас. %
Углерод	0,18–0,22
Кремний	0,17–0,37
Марганец	0,30–0,60
Хром	0,60–0,90
Никель	2,75–3,15
Молибден	0,25–0,35
Ванадий	0,015–0,050
Алюминий	0,015–0,025
Фосфор	не более 0,020
Сера	не более 0,020
Железо	остальное

Комплексные сравнительные исследования, проведенные на наиболее нагруженных шестернях редукторов мотор колес (РМК) автосамосвалов БЕЛАЗ показали, что поверхностная твердость крупномодульных колес из стали 20ХНЗМА после цементации и закалки может достигать 64–65 HRC, в то время как на серийной стали 20Х2Н4А эта величина не превышает 62–63 HRC. Твердость сердцевины шестерен и их зубьев (модуль 10–16 мм) из нового материала — 40–42 HRC, количество остаточного аустенита в слое — 10–15%. Это больше, чем в деталях из стали 18ХГН2МФБА, но заметно меньше, чем при использовании стали 20Х2Н4А.

Лучшие характеристики новая сталь имеет и по распределению микротвердости по толщине слоя. Эффективная толщина упрочненного слоя у стали 20ХНЗМА, определяемая как расстояние от поверхности до твердостей 600, 700 и 750 HV по аппроксимирующей кривой микротвердости, больше, чем у стали 20Х2Н4А (таблица 3).

Исследованиями сталей 20Х2Н4А, 20ХНЗМА и 20ХНЗМА [13] установлено, что из-за повышенного содержания остаточного аустенита (28–30%) наименьшую микротвердость (760 HV_{0,2}) при узкой полосе рассеивания имеют образцы из стали 20Х2Н4А при поверхностной твердости после закалки 60–61 HRC.

Величины микротвердости цементованного слоя образцов из сталей 20ХНЗМА и 20ХНЗМА имеют более высокий уровень (до 770 HV_{0,2}). Более широкая полоса рассеивания микротвердости, полученная на образцах из стали 20ХНЗМА, объясняется ее ограниченной прокаливаемостью при содержании углерода менее 0,5% [13].

Более высокие значения микротвердости упрочненного слоя у деталей из стали 20ХНЗМА позволяют считать, что в условиях эксплуатации ресурс зубчатых колес из стали 20ХНЗМА по кри-

Таблица 2 — Параметры эффективной толщины слоя и структурные характеристики сталей для зубчатых колес

Оценочные характеристики	Сталь		
	20Х2Н4А ГОСТ 4543-71	20ХН3МА	18ХГН2МФБ ТУ 14-1-5183-93
Модуль	10	10	7
Эффективная толщина цементованного слоя (по делительной окружности) до 750 HV _{0,2} до 700 HV _{0,2} до 600 HV _{0,2}	0,4–0,6 0,8–1,0 1,2–1,7	0,7–1 1,0 1,7	0,2 0,4 1,0
Мартенсит ГОСТ 8233-56	Крупноигольчатый, балл 7, мелко и среднеигольчатый, балл 4–6	Мелкоигольчатый, балл 2	Мелкоигольчатый, балл 2
Остаточный аустенит	32–44 %	10–15 %	5–10 %
Карбиды	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют
Величина зерна ГОСТ 5639-82	—	№ 10–11	№ 11–12
По инструкции БЕЛАЗ	Грубоигольчатый троостосорбит	Мелкодисперсный сорбит	Мелкодисперсный сорбит
Феррит	Отсутствует, иногда 1Ф	Отсутствует	Феррит 6–9 % 3Ф
Трооститная зона (зона внутреннего окисления), впадина зуба, нешлифованная поверхность	0,016–0,022 мм Иногда до 0,03 мм	0,012 мм	0,020 мм

териям глубинной контактной прочности превышает ресурс зубчатых колес из стали 20Х2Н4А примерно в 2 раза [1].

Обрабатываемость деталей из стали 20ХН3МА, оцениваемая по комплексным показателям, выше, чем таких же деталей из сталей 20Х2Н4А и 18ХГН2МФБА. Это касается как расхода инструмента, так и коробления деталей на технологических переделах, а также трещиностойкости при шлифовании колес из стали 18ХГН2МФБА.

Отклонения размеров зубчатых колес при закалке и отпуске цементованных деталей, а также после подготовки баз и механической обработки более всего проявляются на погрешностях направления зуба (F_β).

На всех технологических операциях изготовления (фрезеровании, цементации, высоком отпуске, закалке и низком отпуске, шлифовании) средние значения погрешности направления зуба F_β на зубчатых колесах из стали 20ХН3МА более низкие, чем на колесах из стали 20Х2Н4А. После закалки и низкого отпуска среднее значение F_β ниже более чем в 2 раза, среднеквадратическое отклонение (СКО) разности значений этого параметра после операции фрезерования и после ХТО ниже не менее чем на 35–40%. После операции шлифования СКО F_β для новой стали в 3 раза меньше чем для стали 20Х2Н4А. В результате припуск на шлифование может быть снижен не менее чем на 0,2 мм.

С целью получения принципиально новых знаний о перманентном короблении под нагрузкой зубьев шестерен из различных хромоникелевых сталей проведены исследования величины отклонения первоначального направления зубьев колес (F_β), нагружаемых на стенде, работающем в режиме «замкнутого контура». Особый интерес представляет сравнительный анализ отклонений F_β для зубчатых колес из сталей 20Х2Н4А и 20ХН3МА. В начальный период (после шлифования) значения F_β для зубчатых колес из двух марок сталей хотя и отличны друг от друга, однако заметной разницы между этими величинами недостаточно, чтобы назвать ее существенной (рисунок 1). Однако после обкатки и особенно после испытаний в течение

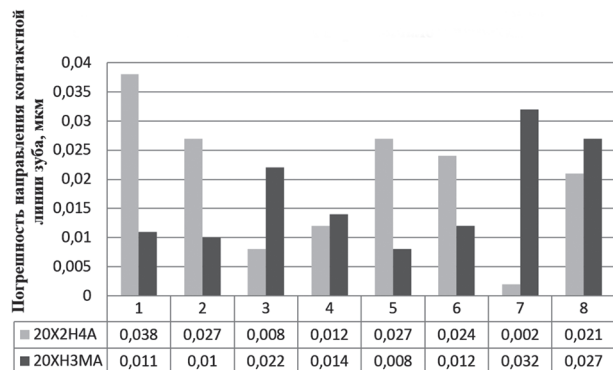


Рисунок 1 — Значение погрешности направления зуба у шестерен из сталей 20Х2Н4А и 20ХН3МА перед началом испытаний

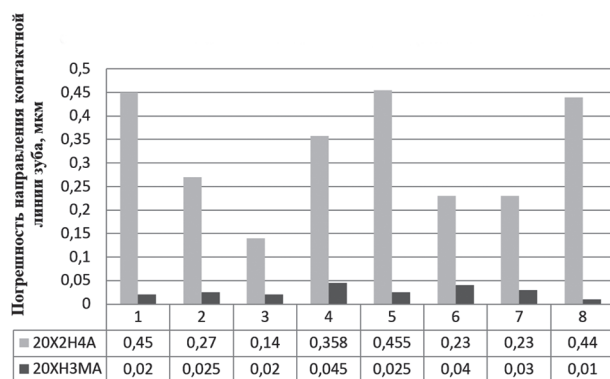


Рисунок 2 — Значение погрешности направления зуба у шестерен из сталей 20X2H4A и 20XH3MA после испытаний (200 часов)

200 часов при напряжениях циклического изгиба равных 1540 МПа изменение первоначально направления нерабочих поверхностей зубьев колес из стали 20X2H4A до 12 раз (рисунок 2) превышает аналогичный показатель деформации колес из стали 20XH3MA при условии, что значения погрешностей на двух этих зубчатых колесах перед началом испытаний, как указывалось, были примерно равны. Указанное отклонение направления зубьев позволяет судить о снижении степени точности: с 6–7-й до 11–12-й при использовании для их изготовления хромоникелевых сталей с содержанием никеля более 3,2–3,5 %. Очевидно также, что общий фактор «износ + коробление» намного больше на шестернях, которые участвуют одновременно в двух зацеплениях (см. рисунок 2).

Отмеченное различие в изменении направления зубьев при эксплуатационных нагрузках в зависимости от материала должным образом сказывается и на нагруженности зубьев, и на ресурсе колес при циклическом изгибе. Проведенные с использованием рекомендаций ГОСТ 12354-81 расчеты НДС зубьев при изгибе показывают, что разница между величинами коэффициента, учитывающего распределение нагрузки по ширине венца, K_{FB} для степеней точности 7 и 8 (по ГОСТ 1643-81) составляет около 34%. И на такую же величину увеличиваются изгибные напряжения, что нельзя не учитывать при создании крупногабаритных зубчатых передач из сталей, склонных к перманентному изменению под эксплуатационной нагрузкой их структуры и, как результат, размеров и формы деталей. В то же время точно учесть на стадии проектирования и производства величину указанного отклонения зубьев пока не представляется возможным. Наиболее рациональным в настоящее время является создание и использование для крупногабаритных зубчатых колес сталей, которые существенно не изменяют структуру и размеры под действием эксплуатационных нагрузок.

Заключение. Созданный новый конструкционный материал — хромоникелевая сталь

20XH3MA — и экспериментальная оценка его свойств, проведенная в лабораторных, производственных и эксплуатационных условиях, позволяет рекомендовать его для изготовления зубчатых колес, к которым предъявляются повышенные требования по надежности, ресурсу, снижению трудоемкости и стоимости.

Применение данного материала позволяет повысить прочность и износостойкость закаленного цементованного слоя, что положительным образом сказывается на сохранении размерной стабильности в эксплуатации деталей. Снижение деформации зубчатых колес при ХТО способствует снижению припуска под шлифование до двух раз и сокращает время обработки. Получение достаточной прокаливаемости сечения крупногабаритных зубчатых колес обеспечит высокий уровень прочности и вязкости сердцевин.

Особый интерес сталь 20XH3MA как малодеформируемая при технологических переделах и в эксплуатации представляет для крупногабаритных зубчатых колес редукторных систем большой мощности и для нешлифуемых зубчатых колес в первую очередь — с круговым зубом.

Список литературы

1. Руденко, С.П. Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Вестник машиностроения. — 2015. — № 11.
2. Карьерные самосвалы особо большой грузоподъемности для дорог с повышенными уклонами / А.М. Насковец [и др.] // Механика — машиностроению: междунар. науч. форум. — 2010. — С. 34–40.
3. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность: ГОСТ 21354-87. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 125 с.
4. Справочник металлста: в 5 т. / под ред. С.А. Чернавского. — изд. 3-е, доп. и перераб. — М.: Машиностроение, 1976. — Т. 1. — 768 с.
5. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справ. / под общ. ред. Э.Б. Вулгакова. — М.: Машиностроение, 1981. — 374 с.
6. Steel, S. The Black Book 1984 / S. Steel. — Grotteborg, Sweden: SKF Steel, 1984.
7. Мариев, П.Л. Повышение конструкционной равнопрочности крупногабаритных деталей и сварных узлов карьерных самосвалов / П.Л. Мариев. — Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001 — 180 с.
8. Производство зубчатых колес: справ. / под общ. ред. Б.А. Тайц. — изд. 3-е, доп. и перераб. — М.: Машиностроение, 1990. — 464 с.
9. Моисеенко, В.И. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / В.И. Моисеенко, П.Л. Мариев. — Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. — 200 с.
10. Гудремон, Э.А. Специальные стали / Э.А. Гудремон. — М.: Металлургия, 1966. — 734 с.
11. Козловский, И.С. Химико-термическая обработка шестерен / И.С. Козловский. — М.: Машиностроение, 1970. — 232 с.
12. Конструкционная легированная сталь: пат. ВУ 16513, МПК С 22С 38/46 / В.И. Моисеенко, Н.Д. Шкатуло. — опубл. 30.10.2012.
13. Повышение эксплуатационных характеристик зубчатых колес карьерных самосвалов посредством оптимизации режимов химико-термической обработки / С.П. Руденко [и др.] // Литье и металлургия. — 2013. — № 2. — С. 110–114.

VITYAZ Pyotr A., D. Sc. in Eng., Academician of NAS of Belarus

Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Metallurgy¹

MOISEENKO Vladimir I., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief Researcher of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High- and Extra-High Capacity Dump Trucks¹

SIDORENKO Alexander G., Ph. D. in Eng.

Head of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High- and Extra-High Capacity Dump Trucks¹

TOMASHEVSKY Dmitry G.

Junior Researcher¹

SHISHKO Sergey A.

Deputy Chief Designer²

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²OJSC “BELAZ” — Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

Received 24 April 2018.

APPLICATION FEATURES OF NEW STRUCTURAL STEEL 20KHN3MA FOR LARGE-SIZED CASE-HARDENING GEARS

The paper gives an analysis and an assessment of the applicability of the most well-known grades of steels used for making large-sized case-hardening gears. It was found that increasing the hardness of the cemented tooth surface with simultaneous provision and preservation of its specified direction is a complex and important task in the creation of case-hardening gears. The features of the change in the dimensions of parts are studied depending on the degree of their nickel alloying. The use of a new material — steel 20KhN3MA — is proposed, which allows us to increase the strength, accuracy, reliability and life of large-sized gears. Of particular interest is the steel 20KhN3MA, as it is poorly deformed during technological alterations and in operation, it is used for large-sized gears of high-power reduction gear systems and for non-grinding cogwheels, first of all with a circular tooth. The material presented in this paper is of interest and can be useful for scientists and engineering services of the engineering industry.

Keywords: service lifetime, strength, reliability, gears, warping, transmission, alloying, case hardening

References

- Rudenko S.P., Valko A.L. Osobennosti rascheta zubchatykh koles transmissiy na glubinnuyu kontaktную vynoslivost [Peculiarities of calculation of gears of transmissions on deep contact endurance]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2015, no. 11, pp. 5–11.
- Naskovets A.M., e.a. Karernye samosvaly osobo bolshoy gruzopodemnosti dlya dorog s povyshennymi uklonami [Dump trucks of extra-large payload capacity for high gradient roads]. *Trudy mezhdunarodnogo nauchnogo foruma “Mekhanika — mashinostroeniya”* [Proc. of the International Scientific Forum “Mechanics for Mechanical Engineering”]. Minsk, 2010, pp. 34–40.
- GOST 21354-87. *Peredachi zubchatye tsilindricheskie evolventnye vneshnego zatsepleniya. Raschet na prochnost* [State Standard 21354-87. Cylindrical involute gears of external engagement. Strength calculation]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1988. 125 p.
- Chernavskov S.A., Reshnikov V.F. *Spravochnik metallista: v 5-ti t.: T. I* [Reference book of metalworker: in 5 vol. Vol. 1]. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 768 p.
- Vulgakov E.B. *Spravochnik: Aviatsionnye zubchatye peredachi i reduktory* [Reference book: Aviation gears and reducers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 374 p.
- The Black Book 1984: Steel Data, Productdata, Tables*. Danderyd, SKF Steel, 1984. 250 p.
- Mariev P.L. *Povyshenie konstruktsionnoy ravnoprochnosti krupnogabarimnykh detaley i svarnykh uzlov karernykh samosvalov* [Increasing the structural equal strength of large-sized parts and welded assemblies of dump trucks]. Minsk, Institut tekhnicheskoy kibernetiki NAN Belarusi Publ., 2001. 180 p.
- Tayts B.A. *Spravochnik: Proizvodstvo zubchatykh koles* [Reference book: Gears manufacturing]. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 464 p.
- Moiseenko V.I., Mariev P.L. *Osnovy strukturnoy ravnoprochnosti krupnogabarimnykh detaley i svarnykh uzlov karyernykh samosvalov* [Fundamentals of structural equal strength of steel and elements of large-sized machine parts]. Minsk, Institut tekhnicheskoy kibernetiki NAN Belarusi Publ., 1999. 200 p.
- Gudremont E.A. *Spetsialnye stali* [Special steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 734 p.
- Kozlovsky I.S. *Khimiko-termicheskaya obrabotka shesteren* [Chemical heat treatment of gears]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 232 p.
- Moiseenko V.I., Shkatulo N.D. *Konstruktsionnaya legirovannaya stal* [Structural alloyed steel]. Patent RB, no. 16513, 2012.
- Rudenko S.P., Valko A.L., Shipko A.A., Bylitskiy V.V., Karpovich P.G. *Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik zubchatykh koles karernykh samosvalov posredstvom optimizatsii rezhimov khimiko-termicheskoy obrabotki* [Improving the performance characteristics of gears for dump trucks by optimizing the modes of chemical-thermal treatment]. *Lite i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2013, no. 2, pp. 110–114.