

ские исследования не выявили разрушений поверхностей этих образцов. Полученные результаты позволяют утверждать, что лазерное упрочнение может быть эффективным методом повышения контактной усталостной прочности только в том случае, если обеспечивается глубинная контактная прочность упрочненного слоя. Поверхностная контактная прочность определяется относительным расположением обработанных лазером участков на рабочей поверхности зубчатого колеса.

Необходимые параметры упрочненного слоя и предельные контактные напряжения могут быть найдены с помощью расчетно-теоретической модели глубинного контактного разрушения поверхностно упрочненных деталей [1, 2]. Исходя из физической модели контактного разрушения высокую контактную прочность деталей, упрочненных лазером, можно объяснить особым структурным состоянием поверхностного слоя. Аустенитно-мартенситная структура, обладающая высокой дисперсностью, твердостью и пластичностью, устойчива к упругопластическим деформациям, поэтому процесс накопления упругопластических деформаций в локальных объемах упрочненного лазером металла при циклическом контактом нагружении не приводит к необратимым структурным превращениям и образованию неустойчивых хрупких вторичных структур, например, таких, как неотпущенный мартенсит. Исследованиями поверхностного слоя после испытаний было установле-

Получено 03.05.2017

но, что соотношение объемов структурных фаз и количество остаточного аустенита в поверхностном слое после длительного нагружения практически не изменилось. На повышение контактной прочности существенное влияние оказывает также благоприятное остаточные напряжения сжатия, обусловленные высокими скоростями теплового воздействия.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что лазерное упрочнение является высокоэффективным методом повышения несущей способности высоконагруженных зубчатых колес, трансмиссий и приводов. При испытаниях деталей упрочненных лазером был выявлен эффект самоорганизации поверхностей трения, в результате чего формируется оптимальный микрорельеф, который характеризуется большими радиусами микронеровностей. Такой микрорельеф способствует образованию упругопластической масляной пленки, разделяющей поверхности контакта зубьев, что также благоприятно сказывается на сопротивляемости изнашиванию и разрушениям.

#### Библиографические ссылки

1. Тескер Е. И. Современные методы расчета и повышения несущей способности поверхностно упрочненных зубчатых передач трансмиссий и приводов. – М.: Машиностроение. 2011. – 434 с.: ил.
2. ГОСТ 21354. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. – М., 1987.

УДК 621.833

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-102-107

**В. Е. Антонюк**, доктор технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск  
**А. М. Гоман**, кандидат технических наук, доцент, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск  
**Н. Н. Ишин**, доктор технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск  
**М. М. Кане**, доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, Минск  
**В. В. Комиссаров**, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель  
**А. С. Скороходов**, кандидат технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск  
**Л. А. Сосновский**, доктор технических наук, профессор, ООО «НПО «Трибофатика», Гомель  
**В. Е. Старжинский**, доктор технических наук, Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель  
**Е. И. Тескер**, доктор технических наук, Волгоградский государственный технический университет

## ПРОБЛЕМЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

### Часть 1. Стандартизация в области точности, видов повреждений и изготовления зубчатых передач

#### Введение

**О**дной из актуальных проблем в стандартизации зубчатых передач, учитывая современное состояние их производства в разных отраслях машиностроения, является гармонизация национальных стандартов ГОСТ с международными ISO и национальными стандартами зарубежных

стран, в первую очередь немецкими стандартами DIN. С одной стороны, как будет показано ниже, заказ зарубежного зубообрабатывающего оборудования, по техническим требованиям соответствующих ГОСТ, заранее снижает качество их производства, но, с другой стороны, отсутствие в стандартах ГОСТ требований по обеспечению ресурса надежности, работоспо-

способности, уровня шума и вибраций и других эксплуатационных требований к зубчатым передачам затрудняет экспорт отечественными производителями конкурентной продукции на внешний рынок.

Таким образом, актуальным становится вопрос разработки рекомендаций по созданию проекта новых базовых стандартов (в частности, стандартов, регламентирующих показатели точности и стандартов по расчету несущей способности зубчатых передач и др.), не противоречащих требованиям стандартов ISO и сохраняющих полезные стороны отечественных документов, имеющих многолетний опыт использования. Кроме того, при переходе к международным стандартам необходимо учитывать специфику установленных норм прочности, производства и эксплуатации зубчатых передач в различных отраслях техники, как это сделано в стандартах по оценке нагрузочной способности морских и высокоскоростных зубчатых передач, промышленных зубчатых передач, зубчатых передач ветровых приводов (ISO 9083:2001, 9084:2002, 9085: 2002, 81400-4:2005), а также технические рекомендации по расчету зубчатых передач на предотвращение заедания (ISO/TR 13989:2000).

Более подробную информацию в целом по решению проблемы стандартизации зубчатых передач и в частности по гармонизации стандартов по расчету несущей способности зубчатых передач можно найти в источниках [1, 2].

В данном контексте следует упомянуть разработанный ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова» (ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова») межгосударственный ГОСТ 13755–2015 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходные контуры» [3] (руководитель разработки проф. В. Л. Дорофеев). Стандарт представляет собой модифицированный вариант международного стандарта ISO 53:1998 Cylindrical gears for general and heavy engineering-standard basic rack tooth profile, MOD. Стандарт имеет статус межгосударственного стандарта (для стран СНГ), регламентирует основные параметры четырех типов исходных контуров (A, B, C, D), (разделы 1–5, приложение A), полностью идентичен вышеуказанному международному стандарту за исключением приложения DA, в котором приведены дополнительные рекомендации с целью учета параметров, изложенных в действующих межгосударственных и национальных стандартах, устанавливающих рекомендации в части параметров исходного контура и профильной модификации, а также области их применения.

В части, касающейся стандартов по показателям точности зубчатых передач, следует обратить внимание на более детально проработанные по сравнению с ГОСТ немецкие стандарты DIN.

#### **Сравнение стандартов ГОСТ, нормирующих показатели точности зубчатых передач, с международными стандартами ISO и германскими стандартами DIN**

Назначение норм точности на наиболее распространенные цилиндрические и конические передачи

определяются ГОСТ 1643-81 и ГОСТ 1758-81. Эти стандарты были разработаны в 1956 г. и с небольшими уточнениями действуют до настоящего времени. Однако соблюдение этих стандартов не решает ни проблемы шума, ни долговечности зубчатых передач. Во-первых, эти стандарты не определяют, какие нормы точности нужно применять к тем или другим передачам. Это должен определить разработчик зубчатой передачи. Во-вторых, эти стандарты теоретически должны одинаково выполняться как изготовителями особо ответственных, так и менее ответственных зубчатых передач как для массового, так и для единичного производства, как для скоростных, так и для тихоходных передач, как для силовых, так и для работающих без нагрузки передач. Поэтому часть изготовителей зубчатых передач руководствовалась своими отраслевыми требованиями по назначению норм точности. Часть изготовителей зубчатых передач вообще не соблюдает в полном объеме требования вышеназванных стандартов. Сравним теперь общее положение с назначением норм точности у зарубежных изготовителей зубчатых передач, в первую очередь с европейской системой DIN.

В системе ГОСТ действуют 10 основных стандартов на цилиндрические зубчатые передачи, 11 – на конические, 9 – на червячные. В системе DIN действуют 64 основных стандарта на цилиндрические, конические и червячные передачи. Этими стандартами определены все основные термины, определения и обозначения, расчеты геометрии, модули, исходные контуры, параметры и допуски. В системе DIN действует большая группа стандартов по фланкированию, изменению коэффициента перекрытия, расчеты на прочность и т. д., не имеющих аналогов в системе ГОСТ. В системе DIN параметры контроля выбираются в соответствии с функциональными требованиями к зубчатой передаче и для каждой из функциональных групп имеются свои контрольные комплексы: группа G – равномерности передачи крутящего момента; группа L – плавности хода и динамической способности к нагрузкам; группа T – статической способности к нагрузкам; группа N – без специфических функциональных требований.

В результате можно сделать следующие выводы:

– система DIN имеет больше показателей точности зубчатых колес, чем наши стандарты, и ряд показателей точности системы DIN в наших стандартах вообще отсутствует;

– система DIN позволяет назначать показатели точности зубчатых передач в зависимости от функционального назначения, в наших гостах такое разделение отсутствует;

– система DIN имеет большое количество дополнительных стандартов по назначению модификаций, фланкирования, применению различных форм зубьев, что расширяет возможности улучшения свойств передачи без существенного изменения основных параметров;

– в системе DIN принципиально отличаются требования к погрешности профиля зуба и погрешности направления зуба.

Если сравнивать тенденции конструкции и технологии изготовления зарубежных зубчатых передач, то большинство зарубежных изготовителей для степеней точности 7 и 8-7 по ГОСТ 1643-81 используют технологические процессы без зубошлифования.

Производство зубчатых колес в зарубежном авто- и тракторостроении имеет ряд принципиальных особенностей в следующих сферах:

- зарубежные конструкции ответственных зубчатых передач имеют различные модификации профиля и формы зуба, конструкции зубчатых передач отечественного авто- и тракторостроения практически не имеют модификаций профиля и формы зуба и не используют возможности модификации для улучшения качества зубчатых передач;

- у зарубежных изготовителей зубофрезерование (зубодолбление) является основной операцией, обеспечивающей высокую точность нарезания зубчатого венца, и для зубофрезерования (зубодолбления) используются червячные фрезы и долбяки класса точности не ниже класса А и АА с различными видами износостойких покрытий; зубофрезерование (зубодолбление) в отечественных производствах зубчатых передач остается черновой операцией без особых требований к точности, еще широко используются червячные фрезы и долбяки класса точности В без износостойких покрытий;

- современное термическое оборудование позволило значительно снизить деформации при термической обработке, и поэтому окончательное зубошлифование производится при небольших припусках порядка 0,15...0,20 мм; у отечественных изготовителей зубчатых передач имеется современное термическое оборудование, но по ряду причин не произошло заметного снижения деформации после термической обработки, и поэтому допускается повышенное коробление зубчатых колес после термической обработки и повышенные припуски под окончательное зубошлифование;

- за рубежом в последние годы создана большая номенклатура станков с ЧПУ для алмазного зубохонингования, и в массовом производстве алмазное зубохонингование заменяет зубошлифование; у отечественных изготовителей нигде не используется алмазное зубохонингование, но интенсивно закупается зубошлифовальное оборудование;

- для контроля массовых зубчатых передач зарубежные изготовители перешли на приборы двухпрофильного контроля с записывающими устройствами, позволяющими исключить ошибки контролера, хранить и статистически обрабатывать информацию о фактической точности зубчатых передач, отечественные изготовители используют для контроля зубчатых передач устаревшие межцентромеры с визуальным контролем, которые не позволяют корректно оценить действительную точность зубчатого колеса.

Недостатки стандартов на зубчатые передачи были известны и ранее, но во времена СССР авто- и тракторостроение, за исключением ВАЗа и КамАЗа, для изготовления зубчатых колес использовали оте-

чественное оборудование и инструменты. Стандарты были той основой, которая регулировала отношения между покупателями и производителями зубообрабатывающего оборудования и инструментов. С развалом СССР практически исчезли изготовители оборудования для производства зубчатых передач. В то же время зарубежное станкостроение создало принципиально новые конструкции оборудования и инструмента для производства и контроля зубчатых передач. Принципиально изменилась технология изготовления зубчатых передач. Отечественные изготовители зубчатых передач продолжают пользоваться устаревшими стандартами и сохраняют принципы старых технологий изготовления зубчатых передач. В связи с необходимостью реагировать на требования по снижению шума и повышению ресурса зубчатых передач начинается закупка отдельных видов зарубежного зубообрабатывающего оборудования. Попытки внедрить современное зубообрабатывающее оборудование для изготовления зубчатых передач по устаревшим стандартам и в устаревшие технологии в конечном итоге не приводит к требуемому улучшению качества изготовления зубчатых передач.

Зарубежные поставщики зубообрабатывающего оборудования работают по стандартам DIN, и никаких трудностей при заказе зарубежного оборудования по чертежам зубчатых колес в системе DIN не существует; поэтому необходима адаптация стандартов DIN к конструкторской документации на отечественные зубчатые передачи.

Для полноты картины рассматриваются итоги исследования, проведенного Б. П. Тимофеевым и М. В. Абрамчуком [4] на предмет оценки соответствия показателей точности в системах ГОСТ 1643-81 и ISO 1328-1:1995, 2:1997, которые пришли к следующим выводам.

Нормы стандарта ISO 1328 могут быть приняты для высоких степеней точности (3-4-я степень) практически во всех диапазонах делительных диаметров и модулей при незначительной разнице (2-3 мкм) между величинами допусков в ISO 1328 и ГОСТ 1643-81. Исключение составляет накопленная погрешность шага зубчатого колеса  $F_{pr}$ , для которой при больших значениях модуля зубьев и делительного диаметра разница допусков в ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 составляет в 4-й степени точности 10 мкм.

В грубых степенях точности (9-12-я степень) при увеличении делительного диаметра и модуля зубьев ГОСТ 1643-81 дает гораздо меньшие значения допусков по сравнению с ISO 1328. Поэтому следует констатировать, что конкурентоспособность отечественной промышленности на мировом рынке при производстве зубчатых колес значительных диаметров в грубых степенях точности обеспечивается уже сегодня, так как она работает в условиях более жестких допусков на зубчатые колеса указанных параметров. Исключение составляют погрешность направления зуба  $F_{\beta r}$  и отклонения шага  $f_{pv}$ . У этих погрешностей допуски в низких степенях точности (9-12-я) в ГОСТ 1643-81

превышают аналогичные допуски в стандарте ISO 1328.

В средних степенях точности (5–8-я) в ГОСТ 1643-81 допуски больше (иногда значительно), чем в ISO, по следующим нормам: погрешность шага зубчатого колеса  $F_{pr}$ ; радиальное биение  $F_{rr}$ ; колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе  $f_i''$  (для малых значений модуля зубьев  $m$ ); колебание измерительного расстояния за оборот зубчатого колеса  $F_i''$  (для малых значений модуля зубьев  $m$ ); отклонения шага  $f_{pr}$ .

Допуски на погрешности по нормам: погрешность направления зуба  $F_{\beta}$ ; колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе  $f_i''$  для средних и больших значений модуля зубьев  $m$ ); колебание измерительного расстояния за оборот зубчатого колеса  $F_i''$  (для средних и больших значений модуля зубьев  $m$ ); погрешность профиля зуба  $f_j$ , в средних степенях точности (5–8-я) в ISO 1328 больше, чем в ГОСТ 1643-81, за исключением некоторых случаев, где разница между величинами допусков находится в пределах 3 мкм.

Создание нового стандарта взамен ГОСТ 1643-81 является актуальной задачей, так как базовый ГОСТ 1643-81 создавался до выхода стандарта ISO 1328. Вместе с тем следует учитывать, что создание нового стандарта с учетом международных рекомендаций требует уточнения целой группы отечественных стандартов, созданных с учетом ГОСТ 1643-81, поэтому разработка нового стандарта взамен ГОСТ 1643-81 должна выполняться как комплексная работа с разработкой всей группы зависимых стандартов.

Конкретные данные по анализу и сравнению показателей точности зубчатых передач в системах ГОСТ, DIN и ISO читатель может найти, обратившись к источникам [5, 6].

#### **Межгосударственный стандарт на виды повреждений зубчатых колес**

Межгосударственный стандарт «Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и описание» [7] разработан совместно специалистами Объединенного института машиностроения и Института механики металлополимерных систем. В работе над проектом принимали участие также специалисты из Волгоградского государственного технического университета. (Разработчики: д-р техн. наук Старжинский В. Е., д-р техн. наук Тескер Е. И., канд. техн. наук Осипенко С. А., канд. техн. наук Солитерман Ю. Л., канд. техн. наук Гоман А. М.) Идея разработки стандарта по классификации и описанию видов повреждений зубчатых колес была поддержана Ассоциацией инженеров механических трансмиссий и приводов Российской Федерации и рядом видных специалистов стран СНГ в области проектирования, производства и эксплуатации зубчатых передач. В стандарте, придерживаясь в основном структуры международного стандарта ISO 10825 [8], уточняется классификация повреждений и их описание на осно-

вании анализа опубликованных результатов исследований как в области зубчатых передач [9–13], так и в механике разрушения и изнашивания [14–20], металловедении [21], трибофатике [22] и смежных дисциплинах.

Стандарт базируется на результатах многолетних исследований разработчиков, их опыта испытаний и эксплуатации механических приводов различного назначения [23–25] и содержит подробное описание характерных видов повреждений зубчатых колес, проиллюстрированное фотографиями и микрофотографиями. Наряду с фотографиями, заимствованными из источников [26–31] и других нормативных и литературных материалов, стандарт содержит иллюстрационный материал непосредственных разработчиков [32].

Стандарт не только описывает характер повреждений, но и указывает наиболее вероятные причины их возникновения, а также наиболее эффективные методы их предотвращения.

Поскольку развитие того или иного характерного вида повреждения определяется комплексным влиянием целого ряда факторов – геометрией зубчатой передачи, условиями зацепления зубьев, величиной и распределением контактного давления, прочностными характеристиками материала зубчатых колес, условиями смазки и характеристиками смазочного материала, а также условиями эксплуатации – стандарт ограничивается только описанием качественной характеристики развития повреждений и возможных путей их предотвращения.

Количественный расчет прочностных характеристик зацепления зубчатых колес следует производить по существующим стандартам: ГОСТ 21354-87 [33], ISO 6336 [34] и DIN 3990:1987 [35] для цилиндрических и ISO 10300 [36] и DIN 3991:1988 [37] для конических передач, расчеты на заедание – по ISO/TR 13989 [38].

Стандарт уточняет терминологию видов повреждений зубчатых колес, классифицирует, идентифицирует и описывает наиболее общие типы повреждений и представляет информацию, которая во многих случаях будет полезна пользователю для идентификации видов повреждений и установления степени их развития.

Стандарт распространяется на все виды металлических ЗК и позволяет классифицировать характер, причины и степень развития повреждений для последующего отражения в технических документах.

Подробное описание видов повреждений (кроме стандарта) дано в источниках [39] (русскоязычный текст) и [40] (англоязычный текст).

#### **Государственный стандарт РФ на проектирование технологических процессов изготовления зубчатых колес**

Стандарт [33] устанавливает методы проектирования технологических процессов изготовления зубчатых колес, включающие методы выбора основных операций обработки зубьев колес и межоперационные значения их точности для зубчатых колес с мо-

дулем  $m = 3,5 \dots 6,3$  мм, делительным диаметром до 400 мм, имеющих 5–12-ю степени точности по чертежу готовой детали согласно ГОСТ 1643, а также выбора основных операций обработки базовых поверхностей зубчатых колес при зубообработке и межоперационные значения их точности для зубчатых колес с делительным диаметром 50...200 мм, шириной венца до 40 мм, отношением длины посадочного отверстия к диаметру опорной поверхности при зубонарезании 0,20...1,05 и диаметром посадочного отверстия 30...80 мм.

Методы и рекомендации, описанные в стандарте, получены в основном в результате исследований закономерностей формирования при зубонарезании и пооперационного изменения параметров точности цилиндрических зубчатых колес на различных операциях их механической и термической обработки, выполненных проф. М. М. Кане. Установлено, что для основных параметров качества и операций обработки цилиндрических зубчатых колес имеет место явление технологической наследственности. Это позволяет получить математические модели изменения параметров качества зубчатых колес на различных операциях их обработки с помощью статистических методов. Были найдены также модели формирования параметров качества колес при зубонарезании в зависимости от точности базовых поверхностей колес и режимов зубонарезания. Данные модели дают возможность решать задачи оптимизации маршрутов обработки колес и требований к качеству колес на промежуточных операциях их обработки при проектировании процессов изготовления колес. Найденные закономерности позволили предложить научно обоснованные методы проектирования технологических процессов изготовления цилиндрических зубчатых колес и разработать соответствующие рекомендации, охватывающие почти 90 % номенклатуры наиболее распространенных в общем машиностроении цилиндрических зубчатых колес. В отличие от используемых методов проектирования технологических процессов на основе информации о технологических возможностях различных операций обработки зубчатых колес и заводского опыта предложенные методы позволяют учесть основные закономерности формирования и изменения параметров качества зубчатых колес при их изготовлении, важнейшие условия обработки (состояние оборудования, конструкцию колеса и др.), четко регламентировать последовательность проектирования технологических процессов обработки зубчатых колес. Все это способствует повышению качества изготовления цилиндрических зубчатых колес и облегчает решение задачи автоматизации проектирования процессов их обработки с помощью средств вычислительной техники.

Стандарт разработан и внесен Белорусской государственной политехнической академией (нынешний БНТУ) (разработчик стандарта – проф. М. М. Кане).

#### **Заключение**

Рассмотрен ряд проектов по стандартизации зубчатых передач в части их производства, испытаний и эксплуатации.

1. На базе сравнительного анализа отечественных стандартов со стандартами DIN и ISO по показателям точности зубчатых передач разработаны рекомендации по их гармонизации.

2. На основе изучения нормативной документации по видам повреждений зубчатых колес разработан межгосударственный стандарт с описанием видов повреждений и рекомендациями по их предупреждению – ГОСТ 31381–2009.

3. Разработан стандарт РБ СТБ 1251–2000, регламентирующий рекомендуемые методы проектирования технологических процессов изготовления наиболее широко распространенных в технике цилиндрических зубчатых колес. Обоснованный выбор маршрутов обработки и требований к точности зубьев и базовых поверхностей зубчатых колес на промежуточных операциях их обработки, учет закономерностей формирования и изменения параметров точности при изготовлении шестерён и условий их обработки, а также четкая регламентация последовательности проектирования технологических процессов способствуют в итоге повышению качества изготовления и облегчают решение задачи автоматизации проектирования процессов обработки зубчатых колес.

#### **Библиографические ссылки**

1. Старжинский В. Е., Солитерман Ю. Л. Россия и страны СНГ обязаны объединить усилия для решения проблем стандартизации // Редукторы и приводы. Новости редукторостроения из Санкт-Петербурга. – 2007. – № 1, 2(08). – С. 21–23.
2. От редакции. Коллегиальное обсуждение изменит существующую ситуацию [в области стандартизации зубчатых зацеплений] в лучшую сторону // Редукторы и приводы. Новости редукторостроения из Санкт-Петербурга. – 2007. – № 1, 2(08). – С. 24–25.
3. ГОСТ 13755–2015. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходные контуры.
4. Тимофеев Б. П., Абрамчук М. В. Сравнение табличных значений параметров точности зубчатых колес и передач в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 // Теория механизмов и машин. – 2007. – Т. 5, № 1. – С. 60–70.
5. Технология производства и обеспечение качества зубчатых колес и передач / В. Е. Антонюк [и др.]; под ред. В. Е. Старжинского и М. М. Кане. – СПб. : Профессия, 2007. – 832 с.
6. Элементы привода приборов // В. Е. Старжинский [и др.]; под ред. Ю. М. Плещачевского. – Минск : Беларуская навука, 2011. – 769 с.
7. ГОСТ 31381–2009. Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и описание.
8. ISO 10825–1995: International Standard. Gears. Wear and Damage to Gear Teeth. Terminology.
9. Там же.
10. ANSI/AGMA 1010-E95: American National Standard. Appearance of Gear Teeth. Terminology of Wear and Failure.
11. DIN 3979:1979: Zahnschaden an Zahnradgetriebe Bezeichnung, Merkmale, Ursachen.
12. ZFN 201: Zahnradschaden Begriffsbestimmung. Bezeichnungen und Ursachen Konzernnorm, Herausgeber. Published by Zahnradfabrik Freidrichshafen AG. Zentrale Technik Normalteilung, 1990.
13. Errichello, R., Gear Failure Analysis: a Textbook for the Gear Failure Analysis, Townsend: Geartech, 2000.

14. ГОСТ 27674-88: Трение, износ и смазка. Термины и определения.
15. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
16. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
17. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
18. ГОСТ 23207-78. Соппротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.
19. *Холодилов О. В., Пилипович Т. П., Петроковец М. И.* Русско-белорусско-английский толковый словарь в области трения, изнашивания и смазки. – Гомель : ИНФОТРИ-БО, 1996.
20. ГОСТ 5272-68. Коррозия металлов. Термины.
21. РД 50-672-88. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов.
22. ГОСТ 30638-99. Трибофатика. Термины и определения.
23. *Солитерман Ю. Л.* Прогнозирование долговечности и выбор рациональных параметров конических передач с круговыми зубьями : дис. ... канд. техн. наук. – Минск : ИНДМАШ АН БССР, 1986.
24. *Тескер Е. И.* О расчете поверхностно-упрочненных зубчатых колес на контактную прочность при действии максимальной нагрузки // Вестник машиностроения. – 1987. – № 3. – С. 14–19.
25. *Тескер Е. И., Матлин М. М.* Критерии предельных состояний при контактном нагружении деталей трансмиссий и приводов. – М. : ООО «Издательство Машиностроение-1», 2006.
26. ISO 10825-1995: International Standard. Gears. Wear and Damage to Gear Teeth. Terminology.
27. ANSI/AGMA 1010-E95: American National Standard. Appearance of Gear Teeth. Terminology of Wear and Failure.
28. DIN 3979:1979: Zahnschaden an Zahnradgetriebe Bezeichnung, Merkmale, Ursachen.
29. ZFN 201: Zahnschaden Begriffsbestimmung. Bezeichnungen und Ursachen Konzernnorm, Herausgeber. Published by Zahnradfabrik Freidrichshafen AG. Zentrale Technik Normalteilung, 1990.
30. *Errichello R.* Gear Failure Analysis: a Textbook for the Gear Failure Analysis, Townsend: Geartech, 2000.
31. *Солитерман Ю. Л.* Указ. соч.
32. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность.
33. ISO 6336:1996(E). Calculation of load capacity of spur and helical gears.
34. DIN 3990:1987. Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern.
35. ISO 10300:2001(E). Calculation of load capacity of bevel gears.
36. DIN 3991:1988. Tragfähigkeitsberechnung von Kegeln ohne Achsversetzung.
37. ISO/TR 13989:2000. Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid gears
38. *Старжинский В. Е., Солитерман Ю. Л., Тескер Е. И., Гоман А. М., Осипенко С. А.* Формы повреждений зубчатых колес. Типология и рекомендации по предотвращению // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 5. – С. 465–482.
39. *Satrzhinsky V. E., Soliterman Yu. L., Goman A. M., Osipenko S. A.* Forms of Damage to Gear Wheels: Typology and Recommendations on Prevention // Journal of Friction and Wear. – 2008. – Vol. 29, No. 5. – Pp. 465–482.
40. СТБ 1251-2000. Цилиндрические зубчатые колеса. Методы проектирования технологических процессов изготовления. (Стандарт Беларуси). – Минск : Госстандарт, 2001. – 115 с.

Получено 18.05.2017

УДК 621.833:539.4

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-107-112

**В. В. Комиссаров**, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель  
**Е. С. Таранова**, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель  
**П. С. Дробышевский**, ОАО «Гомсельмаш»  
**В. О. Замятнин**, ОАО «Гомсельмаш»  
**С. А. Тюрин**, кандидат технических наук, ОАО «Гомсельмаш»  
**Л. А. Сосновский**, доктор технических наук, профессор, ООО «НПО Трибофатика», Гомель

## ОБ ОПЫТЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ НОВОГО КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «МОНИКА»

### Введение

**В** настоящее время на ОАО «Гомсельмаш» большинство зубчатых колес для сельскохозяйственных машин изготавливаются из поковок стали 25ХГТ или 18ХГТ, технологический процесс производства которых достаточно сложен. Это обусловлено необходимостью получения высоких физико-механических свойств материала деталей, работающих в условиях больших динамических и контактных нагрузок. Кроме того, к материалу шестерен предъявляются высокие требования по износостойкости, демпфирующей способности и другим свойствам [1, 2].

Высокопрочный чугу́н с шаровидным графитом давно и широко применяется для изготовления ряда машиностроительных деталей ввиду известных специфических свойств. В редукторостроении зубчатые колеса из специальных чугунов заполняют пробел между закаливаемыми и цементируемыми сталями по такому важному показателю, как контактная усталостная прочность [3–5].

По результатам теоретических и лабораторных исследований, а также промышленных экспериментов был получен высокопрочный чугу́н с шаровидным графитом марки ВЧТГ (высокопрочный чугу́н фирмы «Трибофатика» (Т) и завода «Гомсельмаш»