

интерференцию. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук, - М., 1989.-31с. 2. *Перепелица Б.А.* Автоматизированное профилирование режущих инструментов (теория и алгоритмы): Учебное пособие. - Харьков: ХПИ, 1985.-107с. 3. 3-D моделирование инструментов, формообразования и съем припуска при обработке резанием / Грабченко А.И., Кондусова Е.Б., Кривошия А.В., Равская Н.С., Родин П.Р. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. - 304 с. 4. *Коростелев Л.В.* Кинематические показатели несущей способности пространственных зацеплений // Изв. вузов. Машиностроение, 1964. - №10. – С.5-15. 5. *Шишов В.П.* Теория, математическое обеспечение и реализация синтеза высоко нагруженных передач зацеплением для промышленного транспорта: Дис. ... докт. техн. наук. – Луганск, 1994. – 525 с. 6. *Павлов А.И.* Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100 с. 7. *Шишов В.П., Носко П.Л., Ревякина О.А.* Цилиндрические передачи с арочными зубьями (теория, анализ, синтез): Монография. - Луганск: Изд-во ВНУ им.В.Даля, 2004. – 336 с. 8. *Шишов В.П., Носко П.Л., Ткач П.М., Філь П.В.* Високонавантажени циліндричні передачі з двоопукло-ввігнутими зубьями: Монографія. - Луганськ: Вид-во СНУ ім.В.Даля, 2005. – 216 с. 9. *Воронцов Б.С., Чаплинская Т.Н.* Производящая поверхность реечного типа с изменяемой продольной формой зуба // Системні технології. Регіональний збірник наукових праць. –Випуск 2 (43). – Дніпропетровськ, 2006. – С. 53-56. 10. *Воронцов Б.С., Бочарова И.А.* Компьютерное управление геометрией зубьев зубчатых колес и зуборезных инструментов// Збірник наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну (спецвипуск): Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: ДОП КНУТД, 2005 г. – С.184-189.

Поступила в редакцию 26.04.2006

## УДК 621.833

*В.Е. СТАРЖИНСКИЙ*, д.т.н., ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси  
*Ю.Л. СОЛИТЕРМАН*, к.т.н., ИМИНМАШ НАН Беларуси  
*А.М. ГОМАН*, к.т.н., ИМИНМАШ НАН Беларуси  
*С.А. ОСИПЕНКО*, к.т.н., ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси  
*К.Б. АРНАУДОВ*, д.т.н., ИМИБ Болгарской АН

### **АНАЛИЗ ВИДОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПОДГОТОВКА ПРОЕКТА СТАНДАРТА ПО ИХ КЛАССИФИКАЦИИ И ОПИСАНИЮ**

На основе сопоставления видов повреждений зубчатых колес, проведенного по результатам исследований авторов, а также материалам международных и национальных стандартов, составлена классификация и приведено описание видов повреждений зубчатых колес. Дан анализ возможных причин возникновения и развития характерных видов повреждений и приведены рекомендации по их предупреждению.

Gear failure modes were classified and described on the base of comparing of gear wear and damage, proceeding from the results of authors investigation and data of international and national standards. The analysis of damage appearance possible causes and the development are presented as well as recommendations for their prediction are given.

**Введение.** Широкое применение зубчатых передач в машинах и механизмах различных областей техники, включая высокоскоростные, неизбежно связано с развитием повреждений их зубьев, обусловленных

передаваемой нагрузкой, скоростью вращения, термообработкой, условиями производства и эксплуатации. Для предотвращения возможности проявления повреждений зубчатых колес необходимо проведение квалифицированного анализа характера повреждений зубчатых колес и причин их возникновения. Стандартизация описания видов повреждений зубчатых колес будет способствовать лучшему взаимопониманию конструкторов, технологов и эксплуатационников современных машин и совместной выработке наиболее эффективных мер предотвращения повреждений.

**Цель и задачи исследования.** Целью разработки межгосударственного стандарта является создание квалифицированного руководства для проектировщиков, изготовителей, испытателей и эксплуатационников, содержащего анализ повреждений зубчатых колес, описание причин, их вызывающих, а также рекомендации по предотвращению развитию повреждений.

Задачами разрабатываемого стандарта являются:

- разработка научно обоснованной классификации основных видов повреждений зубчатых колес и причин, их вызывающих;
- детальное описание возникновения и развития характерных видов повреждений, сопровождаемое иллюстрациями внешнего проявления повреждений и, в ряде случаев, микрофотографиями поврежденных областей;
- анализ причин возникновения и развития характерных видов повреждений;
- разработка рекомендаций по предотвращению развития повреждений зубчатых колес.

**Актуальность разработки проекта.** Необходимость разработки Межгосударственного стандарта «Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и описание» подтверждается наличием международного и национальных стандартов:

Стандарт ISO 10825:1995 [1]. Содержит описание 49 видов повреждений зубьев, 59 фотографий и 5 схем, поясняющих развитие повреждений зубьев зубчатых колес.

Стандарт ANSI/AGMA 1010-E95 [2]. Содержит описание 56 видов повреждений зубьев, 56 фотографий и 7 схем, поясняющих развитие повреждений зубьев зубчатых колес. Как указывается в стандарте, он описывает только внешнее проявление различных видов повреждений зубьев и механизм их проявления с единственной целью их грамотной классификации. Решение проблем предотвращения развития того или иного вида повреждений выходит за рамки и назначение указанного стандарта.

Стандарт DIN 3979: 1979 [3]. Содержит описание 35 видов повреждений зубьев, 62 фотографии поврежденных зубьев зубчатых колес.

В нормативном материале ZEN 201 [4] приведено описание 29 видов повреждений и 52 макро- и микрофотографий поврежденных зубьев.

Обширный практический материал по видам повреждений зубчатых колес собран в материалах постоянного семинара «Анализ повреждений зубчатых колес» [5].

Частично общая терминология видов повреждений деталей машин при трении приведена в стандартах:

ГОСТ 27674 [6]. Содержит 12 терминов, которые могут быть применены к анализу повреждений зубчатых колес. Фотографии-эталоны характерных видов повреждений отсутствуют.

ГОСТ 30638 [7]. Содержит 6 терминов, которые могут быть применены к анализу повреждений зубчатых колес. Фотографии-эталоны характерных видов повреждений отсутствуют.

Упомянутые информационные материалы, международный и национальные зарубежные стандарты по терминологии повреждений зубчатых колес касаются, в основном классификации внешнего вида повреждений. Причины возникновения того или иного вида повреждений, меры по предотвращению их развития не обсуждаются. Наличие фотографий поврежденных зубьев облегчает осуществление грамотной классификации и идентификации повреждений.

Идея разработки стандарта поддержана Ассоциацией инженеров механических трансмиссий и приводов.

**Сравнительный анализ и идентификация терминов по видам повреждений зубчатых колес по нормативным источникам.** Идентификация терминов по видам разрушений, проводилась по англоязычным и немецкоязычным нормативным источникам [1-4] и атласу повреждений зубчатых колес [5]. При этом англоязычные термины считались идентичными при наличии или одинакового характера повреждения элементов зубчатого колеса, определяемого по фотографии вида повреждения, или совпадения наименований терминов по всем анализируемым нормативным источникам.

Анализ результатов испытаний [8] и вышеназванных нормативных источников позволяет сделать следующие выводы:

1) Отдельные виды повреждений относятся в разных источниках к разным классам. Например, изнашивание при взаимном внедрении профилей в [1] отнесено к классу изнашивания, в [2] – к классу пластической деформации.

2) Различаются уровни отнесения повреждений к моде характера или моде общего вида повреждений. Например, в [2] эрозия и кавитационная эрозия квалифицируются как различные виды по характеру повреждений, в [1] кавитационное повреждение входит как общий вид повреждения в раздел, характеризующий характер повреждения.

3) В разных источниках отсутствует упоминание об отдельных видах повреждений. В частности, вид механического изнашивания «Полирование» отсутствует в источниках [3, 4], степень повреждения поверхности зуба полированием рассматривается только в [2]. В [1] отсутствуют термины

пластической деформации при холодной и горячей текучести, упоминаемые в [2] и [5]. В источнике [5] не упоминаются такие виды повреждений как адгезионное изнашивание (Adhesion), задиры (Scratching), химическое изнашивание (Chemical corrosion), чешуйчатость (Scaling), образование заусенцев (Burrs), срез зуба (Tooth shear), поломка зуба после пластической деформации (Smear fracture). Имеющиеся в [4] разделы «6. Дефекты изготовления», в том числе трещины в материале и шлаковые включения (Materialrisse, Schlackenzeilen) и «7. Особые виды повреждений», в том числе излом зуба по вершине (Zahnkopfbuch), излом по венцу (Nabenbruch), вмятины на торцах зубьев сменных шестерен (Schaltschäden) и др. отсутствуют в остальных источниках.

4) Визуально одинаковые по характеру и общему виду повреждения классифицируются разными терминами. Например: чрезмерный задиры – severe scratching [1] – severe abrasion [5]; шелушение – flake pitting [1, 2] – Abplatzer [3]; отслаивание – spalling [1, 2] – Abplatzer [4] и др.

При окончательном решении, к какому классу отнести тот или иной вид разрушения, авторы руководствовались характером повреждения и результатами собственных исследований [8]. К каждому англоязычному термину, по соответствующим словарям, справочникам, техническим и нормативным источникам и сложившейся в отечественной теории и практике зубчатых передач терминологии, подбирался соответствующий русскоязычный термин: франкоязычные эквиваленты принимались по [1], немецкоязычные – по [3, 5].

**Область применения и структура стандарта.** Стандарт базируется на результатах многолетних исследований, опыта испытаний и эксплуатации стальных зубчатых колес механических приводов различного назначения и содержит подробное описание характерных видов повреждений зубчатых колес, проиллюстрированное фотографиями и микрофотографиями. Наряду с фотографиями, заимствованными из источников [1-5] и других нормативных и литературных источников, стандарт содержит иллюстрированный материал непосредственных разработчиков [8]. Стандарт не только описывает характер повреждений, но и указывает наиболее вероятные причины их возникновения, а также наиболее эффективные методы их предотвращения.

Хотя стандарт содержит классификацию видов повреждений, характерных для стальных зубчатых колес, многие из описанных видов могут быть использованы при идентификации видов разрушений зубчатых колес из других материалов.

## Классификация видов повреждений

Класс повреждений	Характер повреждений	Общий вид повреждений	Степень повреждения	
Изнашивание	Механическое	Адгезионное	Начальное	
			Умеренное	
		Абразивное	Начальное	
			Умеренное	
			Предельное	
		Изнашивание при взаимном внедрении зубьев		
		Полирование	Начальное	
			Умеренное	
			Интенсивное	
		Усталостное	Начальное	
	Умеренное			
	Предельное			
	При фреттинге			
	В период пуска под нагрузкой			
		Коррозионно-механическое	Химическое (окислительное)	Чешуйчатость
				Окисление при перегреве
	При фреттинг-коррозии			
Эрозионное		Кавитационное		
		Гидроэрозионное		
		Газоэрозионное		
		Гидроабразивное		
		Радиационно-эрозионное		
		Электроэрозионное		

Класс повреждений	Характер повреждений	Общий вид повреждений	Степень повреждения
Заедание	Заедание	Заедание	Начальное (Локализованное)
			Умеренное
			Катастрофическое
Остаточная деформация	Внедрение	Внедрение	
	Пластическая деформация	При холодной текучести	
		При горячей текучести	
		При качении	
		При ударе зубьев	
	Рябь	Рябь	
	Образование гребней и вмятин	Образование гребней и вмятин	
Образование заусенцев	Образование заусенцев		
Пластическая деформация у основания зуба	Пластическая деформация у основания зуба		
Интерференция	Интерференция		
Контактная усталость	Поверхностное усталостное выкрашивание	Макровыкрашивание	Начальное (Прирабочное)
			Прогрессирующее
		Микровыкрашивание	
		Шелушение	
		Отслаивание	
	Глубинное усталостное выкрашивание	Глубинное усталостное выкрашивание	

Класс повреждений	Характер повреждений	Общий вид повреждений	Степень повреждения
Возникновение и развитие трещин	Трещины от термообработки	Трещины от термообработки (закалочные трещины)	
	Шлифовочные трещины	Шлифовочные трещины	
	Трещины обода и диска	Трещины обода и диска	
	Трещины по границе упрочненного слоя	Трещины по границе упрочненного слоя	
	Усталостные трещины	Усталостные трещины	
Разрушение зуба	Излом зуба при перегрузке	Хрупкий излом	
		Вязкий излом	
		Полухрупкий излом	
	Срез зуба	Срез зуба	
	Излом зуба после пластической деформации	Излом зуба после пластической деформации (Продолжительное разрушение)	
	Усталостный излом зуба	Малоцикловой усталостный излом	
		Многоцикловой усталостный излом	Излом по трещине у основания зуба
Излом по трещине на боковой поверхности зуба			
	Излом по трещине у торца зуба		

Стандарт устанавливает 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 износа или развития процесса изнашивания.

Стандарт распространяется на все виды зубчатых колес и позволяет классифицировать характер, причины и степень развития повреждений в технических документах.

Итоговые результаты обобщения и классификация повреждений приведены в таблице. Все повреждения разделены на шесть групп (классов), которые, в свою очередь, подразделяются на определенные группы по характеру, общему виду и степени повреждений.

Содержание стандарта соответствует структуре таблицы, объем занимает 85 листов, количество иллюстраций и рисунков 76. Составлены алфавитные указатели терминов (русский, английский, французский и немецкий). Стандарт снабжен также кратким толковым словарем терминов по видам элементов поверхности разрушения.

Для предотвращения повреждений зубчатых колес следует принимать во внимание и оптимизировать, в зависимости от преобладания вида повреждений, следующие факторы:

- геометрию зубчатой передачи;
- условия зацепления зубьев;
- распределение контактного давления;
- прочностные характеристики материала зубчатых колес;
- характеристики смазочного материала;
- условия эксплуатации.

**Заключение.** Проект стандарта размещен на сайте Госстандарта Республики Беларусь [www.gosstandart.gov.by](http://www.gosstandart.gov.by), раздел «Разработка документов», подраздел «Уведомление о разрабатываемых межгосударственных стандартах» и на российском сайте [www.gears.ru](http://www.gears.ru). Заинтересованные специалисты и организации приглашаются для его обсуждения. Отзывы на проект стандарта просьба направлять по адресу: Беларусь, 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12, ИМИНМАШ НАН Беларуси.

**Список литературы.** 1. *ISO 10825–1995*. International Standard. Gears – Wear and damage to gear teeth – Terminology. 2. *ANSI/AGMA 1010–E95*. American National Standard. Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure. 3. *DIN 3979: 1979*. Zahnschäden an Zahnraetriebe Bezeichnung, Merkmale, Ursachen. 4. *ZEN 201*. Zahnradschäden Begriffsbestimmung. Bezeichnungen und Ursachen Konzernnorm / Herausgeber. Published by Zahnradfabrik Freidrichsafen AG. Zentrale Technik Normabteilung. 1990. 5. *Errichello R*. Gear failure Analysis: A textbook for the gear failure analyst. – Townsend: Geartech. USA. 2000. 6. *ГОСТ 27674–88*. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. 7. *ГОСТ 30638–99*. Трибофатика. Термины и определения. 8. *Солитерман Ю.Л.* Прогнозирование долговечности и выбор рациональных параметров конических передач с круговыми зубьями. Диссертация ... канд. техн. наук. Минск. 1986.

Поступила в редакцию 20.04.06