

## О РЕЗЕРВАХ ПРОЧНОСТИ И КОНСТРУКТИВНОЙ ГИБКОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЙ

Г.А. Журавлев, к.т.н., зав. отделом конструктивной прочности  
НИИ Механики и Прикладной Математики им. Вороновича И.И.,  
Южный Федеральный Университет

Тезисы № 2 по анализу публикации [1] о путях развития редукторостроения.

В статье [1] сделан вывод: «Сопоставляя передачи Новикова и эвольвентные, Г.А. Журавлев пытался доказать, что первые имеют контактную прочность на самом деле более низкую, чем принято считать в соответствии с теорией Новикова, в то время как у вторых имеются «скрытые», ранее неизвестные резервы, неучитываемые стандартными методами расчета. В результате он делает сенсационный вывод, что эти два зацепления обеспечивают чуть ли не один и тот же уровень нагрузочной способности по контактной прочности. И это утверждается несмотря на то, что десятками и сотнями стендовых испытаний в разных организациях и эксплуатационными проверками давно и неопровержимо доказано, что контактная прочность передач Новикова как минимум в 2...3 раза выше, чем у эвольвентных, при любой твердости поверхностей зубьев сравниваемых аналогов.»

На самом деле наличие больших резервов прочности эвольвентных передач является неопровержимым фактом [2...11], а результаты передач ДЛЗ получены на «мягких» колесах либо в сравнении с нерациональными (или переразмеренными) вариантами эвольвентных передач. За 50 лет интенсивной работы над зацеплением Новикова многих тысяч специалистов всех индустриальных стран мира не известно ни об одном рациональном освоении зацепления Новикова с «твердыми» колесами в передовых отраслях машиностроения. Да, эвольвентные передачи имеют большой резерв прочности и он, этот резерв, в некоторой степени реализован (эмпирическим путем) в передовых отраслях. Но еще большие резервы можно реализовать на базе эффектов кривизны контакта в эвольвентных передачах и в эвольвентном зацеплении в целом. Благодаря эффектам кривизны контакта можно реализовать эвольвентное зацепление внеполюсным и с головочным эффектом (в том числе – с большим перепадом твердости зубьев). В традиционных эвольвентных передачах эти особенности достижимы лишь частично. Прежде чем доказывать преимущества передач ДЛЗ с твердыми колесами, надо ответственно подойти к оценке уровня развития эвольвентного зацепления и к выбору параметров сопоставляемых передач. Есть отдельные факты применения передач ДЛЗ в крупносерийном производстве. Отсюда и большие объемы выпуска. Но вместо каких эвольвентных передач стали применять ДЛЗ? И какие колеса ДЛЗ – большинство из них мягкие? Это хорошо известно, да и статья [1] показала, что и сейчас оппоненты закрывают глаза на мировой опыт и на все, что показывает прогресс: «Откуда взяться резервам» [1] в эвольвентном зацеплении? Да потому, что, если бы не было сравнения с устаревшим уровнем эвольвентного зацепления и если бы речь шла только о «твердых» передачах ДЛЗ с грамотной оценкой их конструктивной гибкости, то не было бы ни слов о контактной прочности («в 2...3 раза выше»), ни этих объемов выпуска ДЛЗ. Оценивать надо не любое производство ДЛЗ, а случаи рационального освоения передач с «твердыми» колесами.

Вот здесь и кроется очередной софизм статьи [1], обусловленный традиционными представлениями о повышенной конструктивной гибкости зацепления Новикова. **Конструктивная гибкость** – это способность сохранения показателей работоспособности при изменении внешних параметров. Термин широко применяется в технике и в технических науках, в том числе – в книге М.Л. Новикова. Мнение о том, что зацепление Новикова обладает большей конструктивной гибкостью, чем эвольвентное зацепление,

повторяется во всех монографиях по передачам Новикова. Оно основано на устаревших представлениях о низкой конструктивной прочности торцового профиля зубьев эвольвентной передачи. Наоборот, и это показывают эффекты кривизны контакта, эвольвентное зацепление и смешанное зацепление IP придают большую конструктивную гибкость зубчатой передаче. Нами [2, 3, 9] показано, что зацепление Новикова существенно уступает эвольвентному по этому показателю.

Нельзя судить о контактной прочности зацепления как о чем-то изолированном от ограничений кинематики зацепления. Объективное сравнение потенциальной контактной прочности должно производиться с учетом реальной конструктивной гибкости зацепления Новикова и ограничений передачи по комплексу таких показателей как чувствительность к деформационным и технологическим отклонениям геометрии, изгибная выносливость зубьев, их задиростойкость, виброакустическая активность зацепления. Удовлетворение различным условиям конструктивной гибкости обусловлено потерей той или иной части преимуществ зацепления Новикова по контактной прочности зубьев, вплоть до полного их исчерпания. Особенно это сказалось в «твердых» передачах. Наглядный пример: еще недавно многим казалось, что зацепление Новикова, действительно, может быть использовано в узкоконцевых колесах взамен прямозубых эвольвентных бортовых передач трактора. Кинематически и технологически это достижимо, но вот никаких прочностных преимуществ получить невозможно. Или – взамен ширококонцевой малодеформативной косозубой эвольвентной цилиндрической передачи с углом зацепления  $\alpha_w < 25^\circ$  (с «твердыми» колесами) можно было бы реализовать некоторые преимущества передачи ДЛЗ по контактной прочности, но больший результат достигим улучшением самой эвольвентной передачи на базе эффектов кривизны контакта. Другой пример – ширококонцевая косозубая передача тягового редуктора электровозов ВЛ–10 и ВЛ–80 (модуль зубьев  $m = 10$  мм), но зацепление Новикова в такой передаче принципиально неработоспособно из-за высокой динамической деформативности с изменяющимся отклонением межосевого расстояния передачи  $\Delta a_w$  вплоть до  $\Delta a_w = 5$  мм.

Так или иначе необходимость преодоления различных ограничений, идущих от особенностей кинематики зацепления Новикова, приводит к снижению контактной прочности реальной передачи ДЛЗ. Вопрос – в низкой конструктивной гибкости зацепления Новикова, не позволяющей реализовать эти резервы в наиболее широкой сфере современного производства зубчатых колес. Снять многие ограничения ДЛЗ и увеличить конструктивную гибкость зацепления Новикова можно (благодаря эффектам кривизны контакта) в пространственных передачах смешанного зацепления IP типа *Ваf* [4, 11] с внеполюсными фазами эвольвентного и новиковского зацеплений.

По поводу резервов прочности эвольвентных передач (как, впрочем, и любых тел с номинальным начально-линейным касанием) все подробно изложено в [3, 4] и в других работах, ссылки на которые даны в статье [9]. Более того, приведены [3, 4] результаты отечественных и зарубежных экспериментов, даны необходимые зависимости и упрощенное выражение эффектов кривизны контакта:  $F_p = c \rho^k$ .

Эффекты кривизны контакта, как и наличие значительных резервов контактной прочности тел, моделируемых упругими роликами с пересекающимися под малым углом осями, является фактом, от которого нельзя отмахиваться статьями типа [1]. Реализация эффектов кривизны контакта делает эвольвентное зацепление (в сочетании с его замечательными технологическими преимуществами) недостижимым для зацепления Новикова по конструктивной гибкости в передачах с «твердыми» колесами, в высокоскоростных и/или высокодеформативных передачах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев В.А, Веретенников В.Я. и др. Совершенствование зубчатых передач Новикова остается одним из важнейших направлений развития редукторостроения// Вестник машиностроения – 2007. – № 5. – С. 28-35.
2. Журавлев Г.А. Эффекты кривизны упругих тел с близким к начально–линейному касанием// Труды III Всероссийской конференции по теории упругости с международным участием, г. Ростов-на-Дону-Азов, 13-16 октября 2003. Изд. «Новая книга», г. Ростов-на-Дону. – 2004. – С. 163-165.
3. Журавлев Г.А. Эффекты кривизны контакта тел, моделируемых упругими круговыми цилиндрами, и физические основы совершенствования зубчатых передач// Редукторы и приводы// С.-Петербург. – 2007. – № 1, 2 (08). – С. 73. (полный текст – сайт <http://www.reduktorntc.ru>)
4. Журавлев Г.А. К обсуждению физических основ совершенствования зубчатых передач// Редукторы и приводы. С.-Петербург. – 2007. – № 1, 2 (08). – С. 74-85. (полный текст – сайт <http://www.reduktorntc.ru>)
5. Журавлев Г.А. К выявлению негерцевских взаимосвязей основных факторов контакта тел, моделируемых упругими круговыми цилиндрами// Труды X Международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды». 5-9 декабря 2006. Изд. ООО «ЦВВР». Ростов-на-Дону. – 2006. – Т 2. – С.152-156.
6. Журавлев Г.А. К определению взаимосвязей основных факторов контакта тел, моделируемых упругими роликами с пересекающимися под малым углом осями // Труды XI Международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды» 26-29 ноября 2007, Изд. ООО «ЦВВР». Ростов-на-Дону. – 2007. – Т 2.
7. Журавлев Г.А. К стандартизации исходных контуров зубьев эвольвентного зацепления// 5-й Межгосударственный симпозиум «Теория реальных передач зацеплением», Курган, 1993, с.12-13
8. Основные нормы взаимозаменяемости. ПЕРЕДАЧИ ЗУБЧАТЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЭВОЛЬВЕНТНЫЕ. Исходный контур высоконагруженных передач// ПГ 207-3-92, ГОССТАНДАРТ СССР. – М. – 1992. – 6с.
9. Журавлев Г.А. Ошибочность физических основ зацепления Новикова как причина ограниченности его применения// Редукторы и приводы. Санкт-Петербург. – 2006. – №1. – С. 38-45.
10. Zhuravlev G.A. The Mixed Gearing Engagement Systems// Proceedings of Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms. Vol 1, Italy, Milano. – 1995. – p. 433-437
11. Zhuravlev G. Gear drive (Patent Application PCT/RU2005/000367. July 05, 2005) //Publication WO/2007/008096, F16H 55/08 (2006.01) – 18.01.2007).