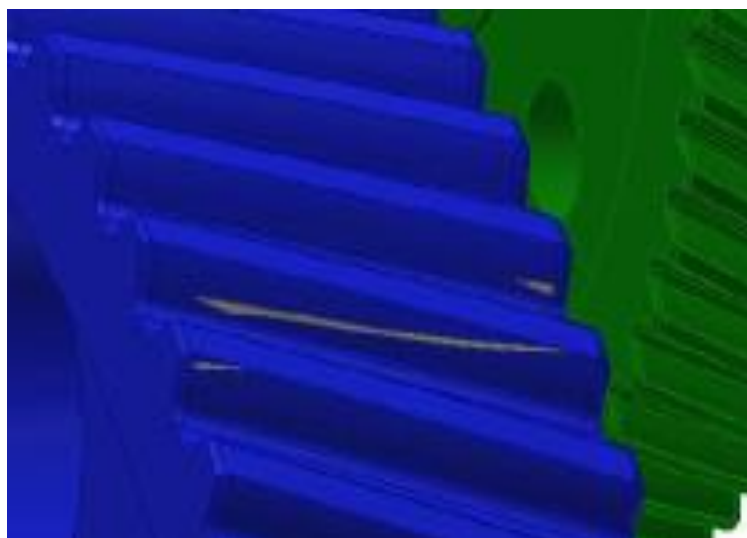


**Ответ на рецензию
на разработку нового вида зубчатого зацепления – ЭЦ-зацепления.**

Ознакомившись с рецензией д.т.н., профессора Волкова А.Э., декана факультета машиностроительных технологий и оборудования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и д.т.н., доцента Медведева В.И., профессора кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», авторы разработки хотели бы отметить следующее:

1. Наши вычисления базируются на тех же основополагающих теоретических положениях, которые представлены рецензентами.
2. Почему-то рецензенты обошли вниманием наш расчет контактных напряжений по Винклеру, приведенный в п. 7.
3. Мы не сомневаемся в том, что для ЭЦ-зацепления расчеты по Герцу приводят к большим погрешностям. Не подходит в этом случае и схема "второй контактной задачи", т. к. а) мы имеем дело не с поверхностями 2-го порядка и б) площадка контакта далека от формы эллипса. Расчет же по формулам Герца приведен в п.9 для сравнения с результатами п.7. Как видим, результаты расходятся значительно.
4. Результаты расчета контактных напряжений, полученные в п.7, нуждаются в экспериментальной проверке, что мы и намерены проделать в ближайшее время.

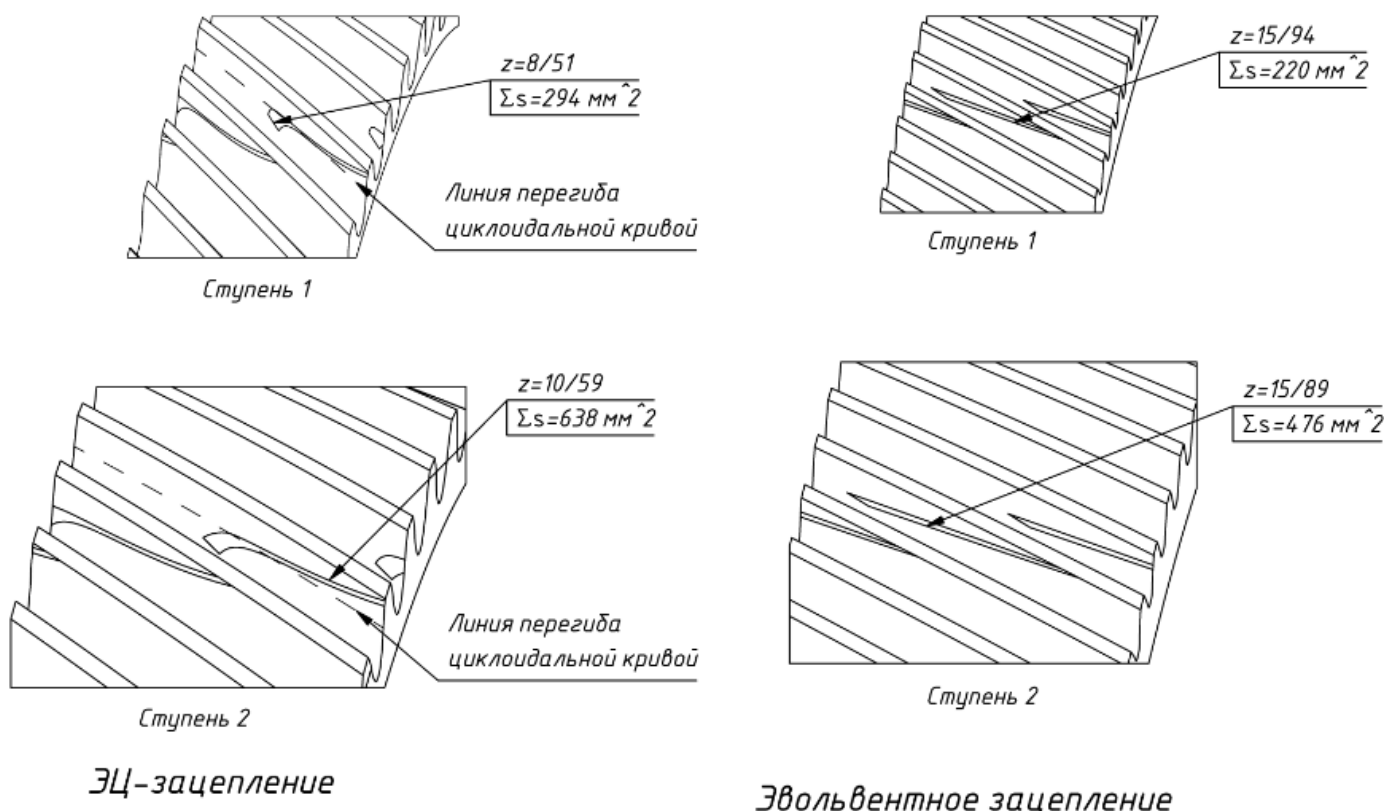
5. Что касается замечания о применимости решения Герца при кромочном контакте в модифицированной версии ЭЦ-зацепления (фиг.2), то следует заметить, что кромочный контакт исключен с помощью фланкирования, как это видно из рис.1 по торцам и на вершине зубьев (аналогично фланкированию в эвольвентном зацеплении).



6. Совершенно не согласны с выводом рецензентов о том, что в ЭЦ-зацеплении «имеет место контакт двояковыпуклых тел». Пятно контакта в ЭЦ-зацеплении имеет две зоны контакта выпукло-выпуклую (*выше линии перегиба циклоидальной кривой на зубе колеса, см. рис. Ниже.*) и выпукло-вогнутую (*ниже линии перегиба*

циклоидальной кривой на зубе колеса, см. рис. ниже), разделяемые линией перегиба.

За счёт вогнутого контакта ЭЦ-зацепление имеет на 10-40% большее пятно контакта по сравнению с эвольвентным зацеплением в косозубых передачах. В качестве примера приведём рабочие расчетные материалы (без фланкирования), по расчёту пятна контакта (максимальное проникновение 30 мкм, допустимое 30-60 мкм) для двухступенчатого цилиндрического редуктора станка-качалки Ц2НШ750Б-37 с ЭЦ-зацеплением (левые рисунки) и с эвольвентным зацеплением (рис. справа), выполненные по одной методике. Видно, что ЭЦ-пятно на первой ступени больше эвольвентного на 33,6%, и ЭЦ-пятно на второй ступени больше эвольвентного на 34%. Увеличенная площадь пятна контакта в ЭЦ-зацеплении прямо пропорционально уменьшает контактные напряжения при равных условиях нагружения.



Таким образом, рецензенты провели анализ только расчета контактных напряжений по Герцу, и на основании этого анализа сделали вывод: «Применяемые математические модели для исследования контакта в передачах с ЭЦ-зацеплением, которые описаны в материалах ЗАО «Технология маркет», являются сильно приближенными». Учитывая, что рецензенты анализировали только расчет по формулам Герца, мы с этим выводом полностью согласны.

Однако не понятно, почему в рецензии не были рассмотрены иные математические модели, использованные нами для расчета, не основанные на решении Герца.

На основе всего вышесказанного считаем вывод рецензентов о недостоверности преимущества ЭЦ-зацепления по нагрузочной способности совершенно неправомерным. Наши расчеты косвенно подтверждают результаты испытаний ЭЦ-зацепления на немецкой фирме «SEW-EURODRIVE», где передача была подвергнута двукратной, по сравнению с расчетной, перегрузке. При этом сломался входной вал передачи, зубья колес не получили никаких повреждений. Аналогичный результат был получен при испытаниях ЭЦ-привода вращения антенны для Министерства Обороны (литера 01), ЭЦ-привод поршня клапана осевого потока для реактора «БРЕСТ-300» (литера 01), ЭЦ-редуктор тягового редуктора мотовоза МПТ-6 (эксплуатируется шестой год) и т.д.

Кроме того без внимания рецензентов остались и другие преимущества ЭЦ-зацепления:

1. Отсутствие подрезания ножки зуба при малом количестве зубьев на шестерне (от трёх). На эвольвенте при построении без смещения д.б. 17 зубьев. **ВЫВОД** – в ЭЦ-зацеплении можно реализовать зацепление не критичное к излому ножки зуба, резать большим инструментом (вести большой съём металла резанием), уменьшить время нарезания зубьев ЭЦ-шестерен (на 30% меньше, по данным компании SEW-Eurodrive, Германия, для зубонарезных станков, на которых нарезается ЭЦ-зацепление).

2. В ЭЦ-зацеплении пятно контакта “бежит” вдоль зуба, а у эвольвенты поперёк зуба. **ВЫВОД** – в ЭЦ-зацеплении нет пульсации передаваемого момента, в отличие от эвольвентного зацепления. В ЭЦ-зацеплении можно реализовать более высокие скорости вращения без уменьшения высоты (модуля) зубьев и без уменьшения передаваемого момента.

3. ЭЦ-зацепление менее требовательно к перекосам по сравнению с эвольвентным зацеплением и менее требовательно к межцентровому зазору по сравнению с зацеплением Новикова (см. статью «Работоспособность эксцентриково-циклоидального зацепления при изменении межосевого расстояния колес. Модификация вершин и впадин зубьев». Вестник машиностр. 2011, №3, стр. 7-9).

Зам. дир. по науке ЗАО “Технология маркет”, патентный поверенный РФ № 1042 – Т.А. Ремнёва
Гл. конструктор, ген. директор ЗАО “Технология маркет” – В.В. Становской
Зав. кафедрой геометрии ТГУ, доктор ф.-м. наук Н.Р. Щербаков.

Рецензия

на разработку нового вида зубчатого зацепления – ЭЦ-зацепления/

По материалам ЗАО «Технология маркет»

1. Общие теоретические положения.

Необходимо развеять одно устойчивое заблуждение, связанное с применимостью решения Герца о контакте двух тел при решении контактной задачи теории упругости в зубчатых передачах.

Имеются две принципиально разные постановки задачи о контакте тел и два разных решения Герца.

Первая контактная задача. Рассматривается контакт двух бесконечных цилиндров с параллельными осями. Причем значение кривизны каждого из контактирующих тел в любом направлении является величиной постоянной. При касании цилиндров имеет место линия касания или линейный контакт.

После приложения нагрузки F , которая сжимает тела вдоль их общей образующей, линия касания превращается в область контакта в виде бесконечной полоски шириной h .

Заметим, что в этой задаче контактирующие тела имеют ненулевую постоянную кривизну только в одном направлении – перпендикулярно линии касания. В направлении линии касания у тел кривизна равна нулю.

Тогда ширина полоски и максимальное контактное давление в каждом сечении, перпендикулярном линии касания, растет пропорционально квадратному корню из передаваемого усилия F (рис.1), т.е. [1]

$$h \sim F^{1/2}, \quad P_{\max} \sim F^{1/2}.$$

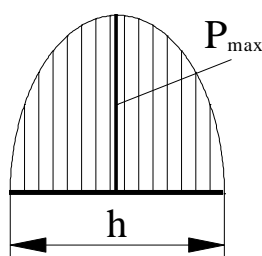


Рис.1. Распределение давлений в первой контактной задаче

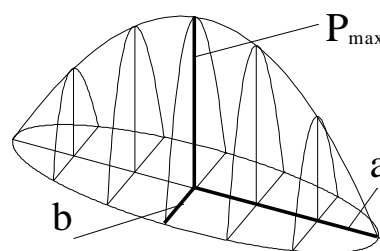


Рис.2. Распределение давлений во второй контактной задаче

Вторая контактная задача. Рассматривается контакт двух тел, ограниченных поверхностями 2-го порядка. Такие тела имеют ненулевую кривизну в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Поэтому их называют двояковыпуклыми. Они касаются в одной точке, т.е. имеет место точечный контакт.

После приложения нормальной нагрузки F точка касания превращается в область контакта, которую можно описать в виде эллипса.

Полуоси эллипса контакта и максимальное давление пропорциональны кубическому корню из передаваемого давления (рис.2), т.е. [2]

$$a \sim F^{1/3}, \quad b \sim F^{1/3}, \quad P_{\max} \sim F^{1/3}.$$

Таким образом, первую задачу можно рассматривать как плоскую контактную задачу (в плоскости, перпендикулярной линии касания), а вторую - как пространственную контактную задачу.

Первая задача применяется при исследовании контакта в передачах с линейным контактом, например, в цилиндрических эвольвентных передачах.

Вторую задачу необходимо использовать в передачах с точечным контактом. К ним относятся, например, конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями.

Поэтому когда проф. С.П. Радзевич на стр.10 своей работы пишет о неприменимости решения Герца в гипоидных передачах, он имеет в виду, что нельзя применять первую контактную задачу. Однако создается впечатление, что он даже не подозревает о существовании второй задачи о контакте двух тел и ее второго решения, которое правомерно для локализованного контакта в гипоидных передачах.

Мы специально занимались вопросом применимости решения Герца при исследовании контакта в зубчатых передачах.

В статье [3] описано сравнение результатов трех решений контактной задачи на примере конических передач с круговыми зубьями. Вычислялись контактные давления с помощью решения Герца задачи о контакте двух цилиндров, с помощью решения Герца задачи о контакте двух тел, ограниченных поверхностями 2-го порядка, и с помощью негерцевского решения контактной задачи [4].

Оказалось, что при локализованном контакте разница между 2-м и 3-м решениями находится в пределах ошибки расчета, т.е. около 5%.

Различие в значениях контактного давления, рассчитанных по методикам 1 и 2, при локализованном контакте может достигать 50%.

Если же в передаче имеет место кромочный контакт, то любое из решений Герца становится неприменимым. В таких случаях необходимо использовать более точные методы, например, негерцевское решение контактной задачи или методы конечных элементов.

2. Замечания по представленным материалам.

2.1. В файле «расчет ЭЦ-зацепление.pdf» дан пример расчета цилиндрической передачи с числами зубьев 8/57 силового ЭЦ-зацепления.

По методике приведенного расчета необходимо замечание.

В п.3 вычисляется полная гауссова кривизна, равная произведению главных кривизн. Т.к. полная гауссова кривизна не равна нулю, то имеет место контакт двояковыпуклых тел.

В п.10 читаем: «ЭЦЗ является пространственной передачей и ее нельзя считать как плоскую задачу по Герцу. ЭЦЗ имеет зоны выпуклого и вогнутого контактов».

Таким образом, авторы декларируют неприменимость первой контактной задачи.

В то же время в п.9 «Определение контактных напряжений по Герцу» приведена следующая расчетная формула:

$$\sigma_H = Z_e \sqrt{\frac{Af(0) \cdot (E) \cdot K_H \beta \cdot K_H \alpha}{2\pi(1-\nu^2) K_c \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}\right) \cdot L_p k \cdot 10^6}},$$

где $Af(0)$ – величина усилия в точке.

Эта формула получена из решения Герца первой задачи о контакте двух цилиндров, т.е. из решения плоской контактной задачи.

2.2. В комментарии Гл. конструктора В.В. Становского и проф. Н.Р. Щербакова к статье проф. А.Л. Филипенкова написано: «Контакт поверхностей в ЭЦ-зацеплении есть контакт высших кинематических пар, поскольку имеет место несовпадения главных направлений контактирующих поверхностей».

Это еще одно подтверждение, что в рассматриваемой задаче для вычисления контактного давления необходимо применение второго решения Герца, при условии отсутствия кромочного контакта.

2.3. В том же комментарии на фиг.1 и фиг.2 показаны результаты решения контактной задачи в передаче с ЭЦ-зацеплением. На этих рисунках изображена тонкая светлая полоска, которую авторы называют пятном контакта. Площадь такого пятна оценочно составляет около 5% общей площади боковой поверхности зуба колеса. Скорее всего, эта полоска является мгновенной контактной площадкой на некоторой фазе зацепления.

На фиг.2 с увеличенной площадью пятна контакта имеет место одновременный контакт на трех зубьях, т.е. трехпарный контакт. Причем пятно контакта выходит на кромки зубьев, т.о. имеет место кромочный контакт. Для кромочного контакта никакая формула Герца не применима.

Подведем итог. В ЭЦ-зацеплении два тела касаются друг друга по некоторой пространственной кривой с переменной кривизной (полная гауссова кривизна не равна нулю всюду, кроме точек перегиба).

Авторы материалов по ЭЦ-зацеплению для исследования контакта применяют следующий прием. Они разбивают тела вдоль линии касания на отдельные участки, которые считаются цилиндрами с прямолинейными образующими и постоянной кривизной. На каждом участке решается плоская (первая) контактная задача с использованием соответствующего решения Герца. В частности, определяется максимальное контактное давление в каждой точке линии касания. Проблема заключается в том, что используемое здесь решение применимо только для контакта двух бесконечных цилиндров постоянной кривизны, а в решаемой задаче кривизна меняется от точки к точке, причем и в направлении линии касания и в перпендикулярном направлении.

Поэтому по предлагаемой модели имеются два вопроса.

Проводилось ли сравнение результатов, полученных с помощью реализуемой модели, с результатами других расчетных моделей, не связанных с решением Герца?

На сколько справедливо в рамках предлагаемой модели использование решения Герца при кромочном контакте, который имеет место в модифицированной версии ЭЦ-зацепления (фиг.2)?

3. Вывод.

Применяемые математические модели для исследования контакта в передачах с ЭЦ-зацеплением, которые описаны в материалах ЗАО «Технология маркет», являются сильно приближенными.

Для исследования контакта в такой сложной передаче, каковой является передача с ЭЦ-зацеплением, необходимо использовать более сложные математические модели, не основанные на решении Герца.

Считаем неправомерными выводы о преимуществах передач с ЭЦ-зацеплением, сделанные на основе расчетных моделей, адекватность которых не проверена.

Литература

1. Решетов Д.Н. Детали машин. – М.: «Машиностроение», 1989.
2. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – Учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1988.
3. Шевелева Г.И., Волков А.Э., Медведев В.И. Сопоставление методик расчета контактных давлений в конических передачах с круговыми зубьями // Вестник машиностроения, 2003, № 6. С.9-12.
4. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел: Монография. – М.: Издательство "Станкин", 1999.

д.т.н., профессор Волков А.Э., декан факультета машиностроительных технологий и оборудования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

д.т.н., доцент Медведев В.И., профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»