

УДК 621.91:622

В. В. Горлов, аспирант,

Научный руководитель: **Н. В. Сурина**, к.т.н., доц., Московский государственный горный университет

E-mail: kaftmr@msmu.ru

Анализ влияния погрешностей профиля зуба на нагрузочную способность цилиндрических зубчатых колес

Статья посвящена исследованию напряженных состояний цилиндрических зубчатых колес, изготовленных с погрешностью профиля зуба. Исследование ведется методом конечных элементов с приложением номинальных нагрузок.

Ключевые слова: зубчатые колеса, качество, метод конечных элементов, нагрузочная способность.

V. V. Gorlov, N. V. Surina

Analysis of the Effect of Errors of the Tooth Profile on the Load Carrying Capacity of Cylindrical Gears

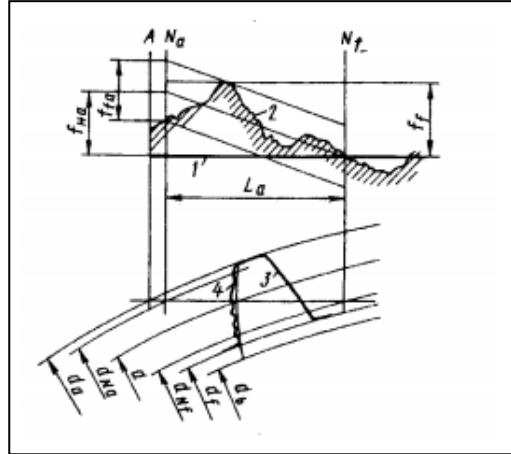
The article is dedicated to investigation of tension of spur gears, manufactured with intolerable teeth profile errors. The analysis is carried out with finite element method.

Keywords: gears, quality, finite element method, loadability.

Погрешности изготовления зубчатых колес приводят к повышению динамических нагрузок, вибрации, шуму передач и преждевременному выходу механизмов из строя. Надежность зубчатых колес закладывается на стадии их нарезания. Возможная погрешность изготовления на этом этапе усугубляется в процессе высокотемпературной химико-термической обработки, поэтому качеству и точности нарезания зубчатых колес необходимо уделять особое внимание.

ГОСТ 1643-81 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» насчитывает более 20 параметров точности зубчатых передач, разделённых на четыре нормы точности: кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев бокового зазора. Как показывает практика, на стадии механообработки основной проблемой для отечественного производителя, как правило, является получение профиля зуба, соответствующего заявленной степени точности. Погрешность профиля зуба относится к нормам плавности работы.

Погрешность профиля зуба f_{fr} - расстояние по нормали между двумя ближайшими друг к другу номинальными торцовыми профилями зуба, между которыми размещается действительный торцовый активный профиль зуба зубчатого колеса. Погрешность профиля измеряют с помощью эвольвентомеров или измерительных центров. Теоретически точный эвольвентный профиль 3 зубьев, записанный измерительным прибором в увеличенном масштабе, представляет собой прямую линию. Как правило, эвольвентный профиль 4 имеет отклонения от теоретической точной формы в «+» или «-», и его форма изображается в виде кривой линии 2. Диаметры N_a и N_f ограничивают активную линию профиля соответственно на головке и ножке зуба на длине измерения L_a .



Многие производители цилиндрических зубчатых колес для более точной оценки погрешности профиля f_{fr} рассматривают ее состоящей из погрешности формы профиля f_{fa} и угла профиля f_{Ha} .

Многие производители цилиндрических зубчатых колес для более точной оценки погрешности профиля f_{fr} рассматривают ее состоящей из погрешности формы профиля f_{fa} и угла профиля f_{Ha} .



Рис. 1. Зубоизмерительная машине Mahr GMX 400

Наряду с числовыми значениями погрешностей профиля зубьев очень важна также аналитическая оценка графически записанной формы профили: длины активной линии профиля и его угла, наличия необходимых модификаций, волнистости и т.д.

Наиболее полную информацию о характере и причинах возникновения погрешностей зубьев дает аналитический контроль. На

сегодняшний день существует ряд специализированных высокоточных зубоизмерительных машин с ЧПУ, способных дать картину комплексного качества цилиндрических зубчатых колес по всем четырем нормам точности в графическом виде, что существенно облегчает анализ протоколов измерения.

Для оценки погрешностей профиля зубьев цилиндрических зубчатых колес был проведен ряд замеров на зубоизмерительной машине Mahr GMX 400 (рис.1).

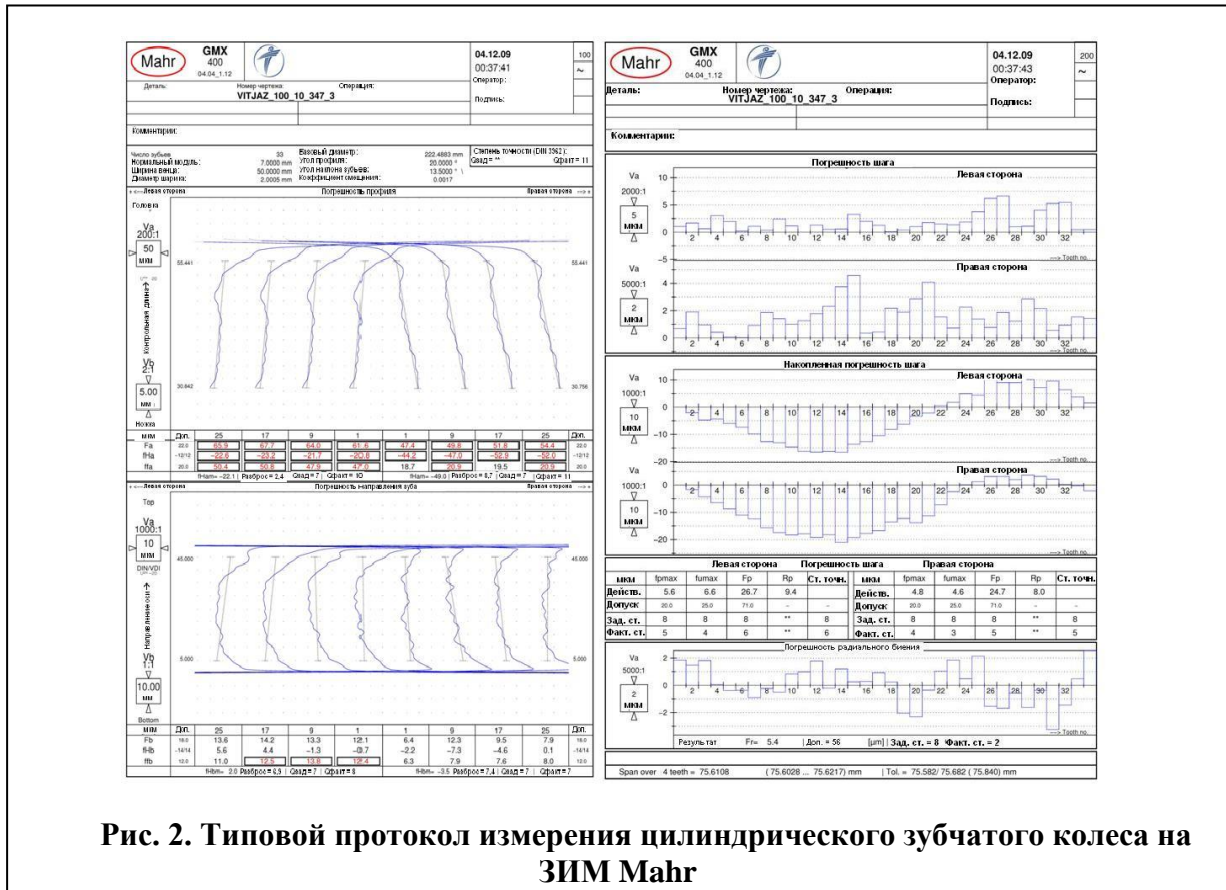
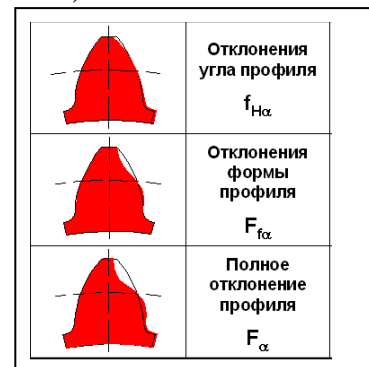


Рис. 2. Типовой протокол измерения цилиндрического зубчатого колеса на ЗИМ Mahr

Идеальный профиль зуба на таких протоколах выглядит как вертикальная прямая линия. Зубоизмерительные центры Mahr оценивают профиль зуба по трем составляющим:

- Отклонения угла профиля $f_{H\alpha}$ (согласно DIN 3962) – это отклонения угла профиля, не зависящие от отклонений формы профиля.
- Отклонения формы профиля F_{fa} (согласно DIN 3962) – это отклонения формы профиля, не зависящие от отклонений угла профиля.
- Полное отклонение профиля F_{α} (согласно DIN 3962) представляет собой взаимное наложение отклонений угла и формы профиля.



Располагая данными о действительном профиле зуба, можно построить трёхмерную твердотельную модель цилиндрической шестерни с реальной формой зуба. За основу была взята шестерня главного редуктора очистного комбайна K500. Замер показал погрешность профиля правого фланка зуба на данной детали 89.9 мкм. Левая сторона зуба имеет погрешность 48.8 мкм. В программном пакете SolidWorks с помощью модуля GearTrax были построены две модели шестерни. Затем одна из моделей подверглась модификации профиля зубьев в соответствии с результатами замера на зубоизмерительной машине. Эскиз реального профиля зуба шестерни, вписанного в идеальный эвольвентный профиль представлен на рис. 3.

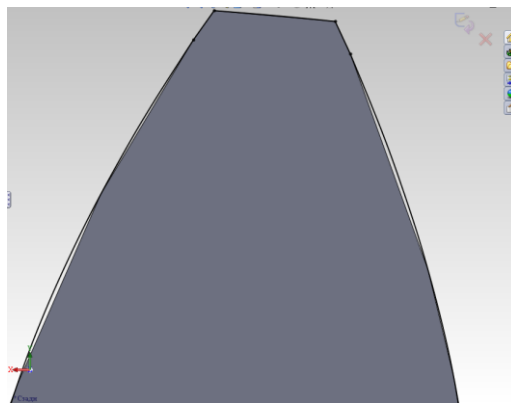
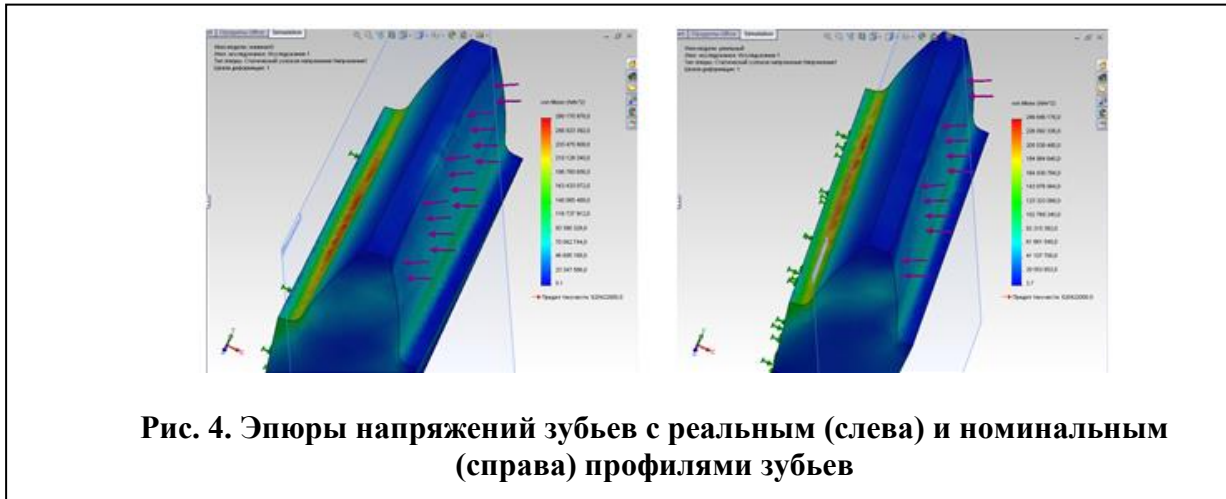


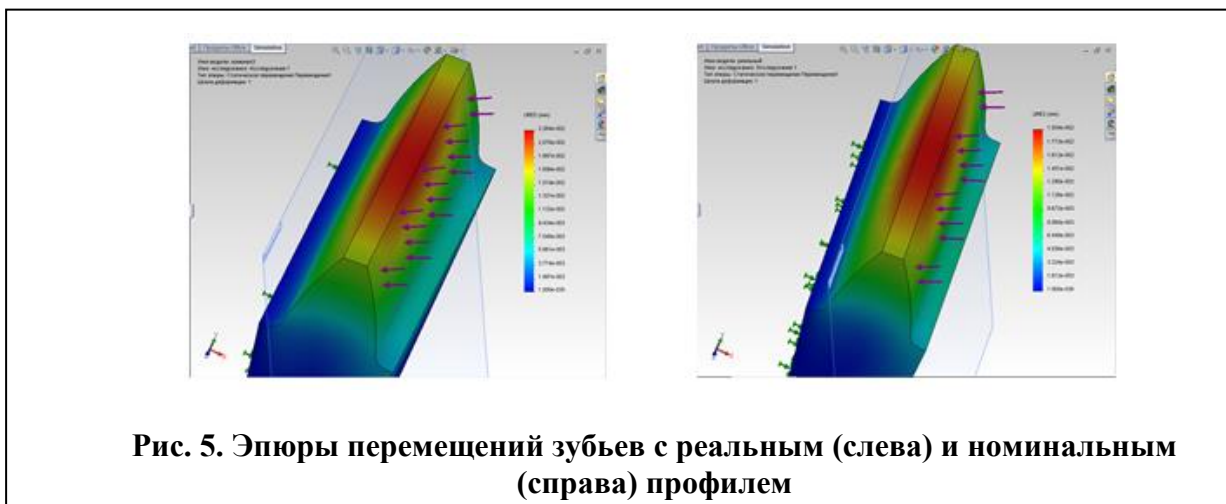
Рис.3. Реальный профиль зуба шестерни, вписанного в идеальный эвольвентный профиль

После выбора соответствующего материала деталей, а также симуляции цементированного слоя на венцах шестерен, с применением метода конечных элементов, к проекциям теоретических пятен контактов на поверхности зубьев была приложена номинальные окружная сила 46764 Н. На основании этих входных данных были построены эпюры напряжений, перемещений, деформаций и запаса прочности зубьев с искаженным и номинальным профилями. Была предпринята попытка сравнительного анализа изгибных напряжений зубьев с номинальным и искаженным профилем.

Сравнительный анализ эпюр напряжений зубьев с искаженным и номинальным профилями выявил большее (на 13%) напряжение на зубьях с искаженным профилем. Кроме того, эпюры указывают на менее равномерное распределение напряжений на зубе с искаженным профилем. На обоих зубьях максимальное напряжение предсказуемо возникает в ножке зуба со стороны, противоположной области приложения силы.



Так, к примеру, на эпюрах хорошо заметно, что напряжения на искаженном профиле возникают и на вершине зуба, в то время как вершина зуба с номинальным эвольвентным профилем практически не напряжена.

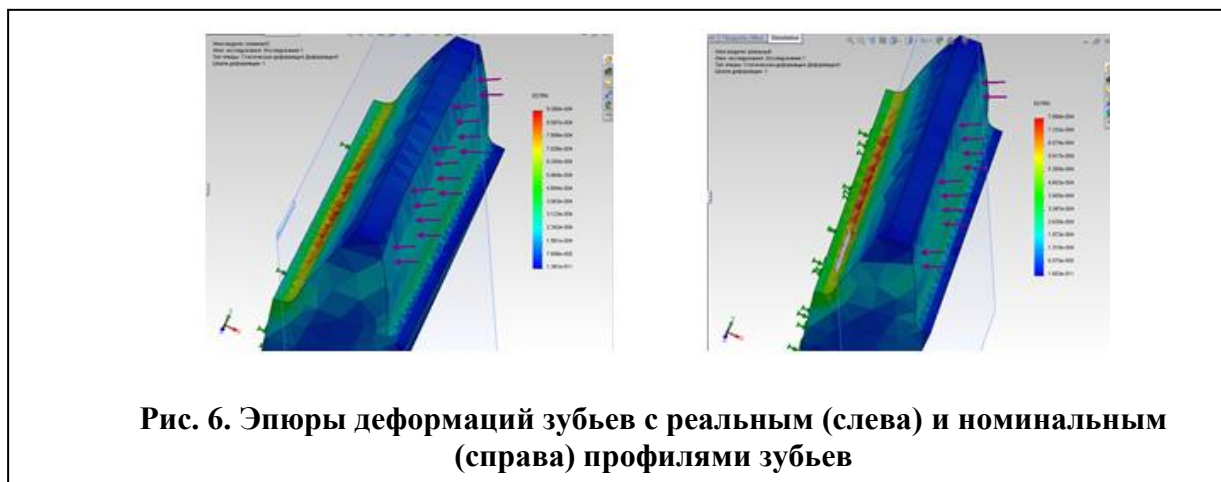


Аналогичную картину можно наблюдать и на эпюрах перемещений зубьев. Значение перемещений под нагрузкой зуба с искаженным профилем больше на 17%, а распределение перемещений менее равномерно. Наибольшие перемещения расположены у головки зубьев. Эпюры деформаций зубьев имеют схожий с эпюрами напряжений характер. Максимальные деформации приходятся на ножку зуба с фланка зуба, противоположного зоне приложения силы. Как и на рассмотренных эпюрах, наблюдается большая неравномерность на зубе с искаженным профилем. Большее значение деформаций имеет зуб с искаженным профилем.

Эпюры деформаций зубьев имеют схожий с эпюрами напряжений характер. Максимальные деформации приходятся на ножку зуба с фланка зуба, противоположного зоне приложения силы. Как и на рассмотренных

эпюрах, наблюдается большая неравномерность на зубе с искаженным профилем. Разница в деформациях на зубьях с искажённым и номинальным профилем составила около 18%.

Расчет показал, что запас прочности зубьев с искаженным профилем на 18% меньше, чем на зубьях с номинальным профилем.



Таким образом, исследование показало, что обработка зубьев с погрешностью профиля 90мкм снижает нагрузочную способность зубчатого колеса на 18%. При комбинации погрешностей профиля с другими погрешностями, такими, как погрешности направления зуба, окружной шаг и радиальное биение, это значение теоретически может существенно возрасти. Во избежание катастрофического падения ресурса зубчатых колёс необходимо уделять особое внимание окончательной обработке зуба.

Список литературы

1. **Калашников А.С.** «Технология изготовления зубчатых колес». М: Машиностроение, 2004
2. **Материалы Группы Технополис**
3. **Материалы компании «Mahr»**
4. **Калашников С.Н., Калашников А.С. , Коган Г.И.** под ред. **Тайца Б.А.** «Производство зубчатых колёс: Справочник». М: Машиностроение, 1990
5. **DIN 3961.** Tolerances for Cylindrical Gear Teeth; Bases. Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard)
6. **DIN 3962-1** Tolerances for Cylindrical Gear Teeth; Tolerances for Deviations of Individual Parameters. Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard)
7. **ГОСТ 1643-81.** Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Государственный стандарт Союза ССР.