

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Санникова Александра Михайловича на тему «Совершенствование метода оценки распределения нагрузки в многопарных спироидных передачах путём учёта упруго-пластического характера контакта», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин»

### **Актуальность избранной темы**

Одним из важнейших оценочных показателей работоспособности зубчатой передачи является максимальное контактное давление и распределение напряжений в зубьях. Первые алгоритмы по расчету напряжений в зубьях колес появились в начале 80-х годов прошлого века в работах L. Wilcox и Г.И. Шевелевой. Сначала эти расчеты относились к контактному давлению в круговых зубьях конических и гипоидных передач. Но затем благодаря работам отечественных (Э.Л. Айрапетов, В.Н. Сызранцев, Е.С. Трубачев) и зарубежных (Y. Zhang, J. Argyris, V. Simon, H. Ding) ученых довольно быстро распространились и на такие типы передач как: цилиндрические передачи с арочными зубьями, червячные и спироидные передачи и др. Расчет контактных давлений проводится разными методами: методом конечных элементов, методом граничных элементов, на основе решения Герца, но все они основаны на теории упругости.

Еще в конце прошлого века было замечено, что расчетные контактные напряжения для работающих зубчатых передач часто превосходят предельные контактные напряжения. И это не приводит к выходу передачи из строя. Эта проблема имеет два решения. Первое связано с необходимостью пересмотра значения предельных контактных напряжений. Второе – с необходимостью пересмотра методов контактного взаимодействия, в частности, с учетом пластической деформации зубьев. И если для первого решения требуется огромное количество экспериментов, то для реализации второго требуется, в первую очередь, разработка методики одновременного учета упругих и пластических деформаций.

Спироидные передачи являются одними из наиболее нагруженных узлов редукторов трубопроводной арматуры. Испытания низкоскоростных тяжело нагруженных спироидных передач в ООО «МИП «Механик» показали наличие пластической деформации зубьев и необходимость учитывать ее при проектировании. Дополнительную сложность вносят многопарность контакта в спироидной передаче и наличие неизбежных погрешностей изготовления, монтажа и эксплуатации. Поэтому разработка методов решения контактной задачи в передачах этого типа с учетом упругих и пластических деформаций является новой и актуальной задачей.

### **Научная новизна и результаты работы**

Целью диссертационной работы является совершенствование метода расчета напряжений в зацеплении с учетом многопарного упругопластического характера контакта зубьев и на его основе обеспечение требуемой несущей способности спироидных передач.

Указанная цель достигается путем решения ряда задач, которые и определили научную новизну и практическую ценность диссертации.

Первой и главной задачей исследования является разработка метода и алгоритма расчета распределения нагрузки с учетом многопарного упругопластического характера контакта.

Эта задача решена в главе 2. За основу взят алгоритм, описанный в кандидатской диссертации Кузнецова А.С. Алгоритм позволяет рассчитать распределение нагрузки при упругом многопарном контакте в спироидной передаче с учетом различных погрешностей.

Соискатель ввел несколько принципиальных новшеств. Предложена классификация ячеек сетки боковой поверхности зуба колеса и витка червяка. Все ячейки делятся на четыре типа, причем в ячейках первого типа происходит упругопластическая деформация, а значения сил в этих ячейках остаются неизменными. Также предложен расчет пластического перемещения в ячейках первого типа в зависимости от этапа учета пластической составляющей.

Разработка метода и алгоритма распределения нагрузки при многопарном упругопластическом характере контакта является главной составляющей научной новизны диссертационного исследования.

В главе 3 описана проверка предложенного метода и алгоритма

распределения нагрузки при упругом и упругопластическом характере контакта. Для этого были проведены две серии специальных проверок. Первая – на упрощенной физической модели однопарного контакта и на численных моделях. Для численного моделирования автор реализовал новые алгоритмы в действующей САПР «SPDIAL+». Вторая – на спироидной передаче с возможностью контроля нагруженности заданных участков зуба.

В работе принято очень разумное решение – выделить один фактор, чтобы обеспечить повторяемость результатов исследования и целенаправленное изменение нагрузки в заданных участках зуба. Выбор огранки в качестве доминирующего фактора вполне оправдан.

В главе 4 проведено комплексное исследование влияния разнообразных погрешностей на изменение нагруженности спироидной передачи. В процессе исследования проведена оценка влияния шести погрешностей на три выбранных показателя степени нагруженности передачи. Оценка проводилась в шести фазах зацепления на нескольких мгновенных площадках на правых и левых боковых поверхностях. Это потребовало от автора проведения нескольких сотен расчетов с помощью САПР «SPDIAL+».

На основе полученных результатов установлены зависимости влияния погрешностей изготовления, монтажа и деформации элементов конструкции в результате эксплуатации на распределение нагрузки с учетом многопарного упругопластического характера контакта, что составило второй пункт научной новизны диссертационного исследования.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Основной научный результат сформулирован в первом пункте научной новизны работы на стр.7. Несмотря на то, что ранее упругопластический контакт не рассматривался в работах ученых-зубчатников, данная диссертация базируется на многочисленных исследованиях упругого взаимодействия в зубчатых передачах. К ним следует, в первую очередь, отнести работы Г.И. Шевелевой, Э.Л. Айрапетова, М.Г. Сегалья, В.И. Медведева, Е.С. Трубачева, А.С. Кузнецова и многих зарубежных ученых. Развитие теории контакта зубьев под нагрузкой с учетом возможного пластического деформирования основывается на адекватных допущениях, принятых при перераспределении

нагрузки, вызванной появлением пластической деформации, сформулированных и обоснованных на стр. 45-46. Алгоритм перераспределения нагрузки, вызванной появлением пластической деформации, изложен на стр.48-53 логически точно с необходимыми пояснениями отдельных нюансов. Разработанный алгоритм был встроен в уже работающий и неоднократно проверенный программный комплекс САПР «SPDIAL+». Таким образом, программный комплекс был дополнен модулем расчета пластической деформации зубьев и моделирования износа рабочих поверхностей. Его работоспособность была подтверждена многочисленными экспериментами, описанными в диссертации.

Все сказанное выше подтверждает справедливость первого основного результата работы, представленного на стр.156. Отсюда можно сделать вывод, что цель диссертационной работы достигнута.

Второй основной результат работы базируется на разработанных автором моделях пластического деформирования микро- и макронеровностей. Его справедливость подтверждается фактом более равномерного распределения нагрузки в тяжело нагруженных спироидных передачах при пластическом деформировании огранки.

Третий результат связан с вводом дополнительных параметров, способствующих ускорению сходимости итерационного процесса расчета пластических перемещений. Выбор значений этих параметров и доказательство ускорения сходимости итерационного процесса дано на стр. 55-59.

Четвертый основной результат основан на численном и натурном экспериментах, проведенных автором в рамках подготовки диссертационной работы. Достоверность результатов работы подтверждается следующими положениями:

- сравнением результатов, полученных с помощью САПР «SPDIAL+» и с помощью универсальной программной системой ANSYS. Расхождение не превышает 9% (стр.88);

- сравнением результатов, полученных с помощью САПР «SPDIAL+», и с помощью упрощенной модели однопарного контакта. Максимальное расхождение составило 16,7% (стр.88).

В частности, количество ячеек, подвергнутых пластическому перемещению и выявленных расчетным путем, сравнивалось с пятнами

деформации на натурном образце. Число таких ячеек не превышает 11,4% от всех ячеек области контакта в рассматриваемой фазе зацепления.

Пятый основной результат работы определяет те погрешности, которые оказывают наиболее сильное отрицательное влияние на степень концентрации нагрузки. К ним относятся, как и следовало ожидать, погрешности шага и межосевого угла, что подтверждает адекватность модели. Испытаниями показано, что за счет локализации контакта можно повысить нагрузочную способность спироидных передач трубопроводной арматуры в 1,4 раза.

Шестой результат констатирует внедрение результатов диссертации в практику проектирования спироидных передач в ООО «МИП «Механик» и в учебный процесс в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», что подтверждено соответствующими актами.

### **Оценка содержания диссертационной работы**

Диссертационное исследование включает введение, основное содержание работы в четырех главах, заключение, список литературы из 142 наименований, два приложения с протоколами испытаний редукторов и актами внедрения. Диссертация изложена на 193 страницах, включает 117 рисунков и 47 таблиц.

Диссертация написана грамотным научным языком. К ее оформлению, а также к логике изложения материала замечаний нет. В диссертации имеются необходимые формулы, иллюстрации и таблицы, способствующие раскрытию сути диссертационного исследования.

Автореферат написан грамотно и отражает суть проведенного исследования. Публикации автора содержат основные положения диссертации.

### **Замечания по содержанию диссертационной работы**

1. Не понятно, как в работе диагностируется кромочный контакт (стр. 34 и стр. 120, рис. 4.1.11). Какова модель кромки: острое ребро или скругление? Про радиус скругления кромки в работе ничего не говорится.

2. В формуле (4.1.3) расчет следует проводить либо по модулю, либо переставить слагаемые в числителе. Иначе,  $\Delta T_{2j}$  получается отрицательным, если  $T_{2jуп} > T_{2jу}$ .

3. На стр.114 обсуждается результат из табл.4.1.4 для набора погрешностей №12. Момент, передаваемый площадкой у носка зуба, вырос на 891%, т.е. практически в 10 раз. Это означает, что площадка при упругом контакте было нагружена слабо, а при упругопластическом контакте нагрузка на нее в 10 раз увеличилась. Но в табл.4.1.4, где для набора №12 даны значения момента  $T_{2j}$  в двух вариантах: при упругом характере контакта и при упругопластическом, отсутствуют значения, отличающиеся в 10 раз.

4. На стр.111 дано пояснение к табл.4.1.3 и другим: для наглядности жирным шрифтом выделены значения вращающих моментов в парах зубьев с наиболее заметным изменением этих величин при упругопластическом характере контакта по сравнению с упругим контактом. Сравним результаты из табл.4.1.3 для момента  $T_{2j}$  в 1-й фазе для наборов погрешностей 5 и 6. Значения для набора 6 выделены жирным шрифтом:  $T_{2jy} = 1830$  Нм и  $T_{2jуп} = 1813$  Нм. Т.е. изменение составило 17 Нм. В то же время значения для набора 5:  $T_{2jy} = 1658$  Нм и  $T_{2jуп} = 1625$  Нм. Изменение составило 33 Нм. Однако эти данные выделены обычным шрифтом.

5. Вызывает сомнение вывод 3 к параграфу 4.1. В нем говорится, что зацепление левых боковых поверхностей менее склонно к образованию очагов пластической деформации. Рассмотрим расчеты, сделанные для передачи редуктора РЗА-С-4000 для левых боковых поверхностей (табл.4.1.6, стр.124) и для правых боковых поверхностей (табл.4.1.4, стр.116). Сравним величину  $w_p$  пластического перемещения для наборов погрешностей №12 и № 14. Пластические перемещения на площадках 4, 5, 6 для левой стороны превосходят перемещения для правой стороны.

6. В табл.4.1.2 на стр.111 приведены наборы погрешностей, участвующих в исследовании. В первых 11 наборах присутствует только одна из погрешностей. В то же время, как показали исследования, наибольшее негативное влияние оказали наборы 12 и 14, в которых представлены все погрешности. Из этого исследования трудно сделать вывод о том, какая комбинация из двух или трех погрешностей внесла наибольший отрицательный вклад.

Впрочем, указанные замечания носят скорее технический характер и не снижают практической ценности работы и не дают оснований сомневаться в ее научной новизне.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (пункт 28)**

Диссертационная работа Санникова Александра Михайловича является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для повышения нагрузочной способности низкоскоростных тяжело нагруженных спироидных передач, применяемых в редукторах трубопроводной арматуры, что соответствует п. II.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

Результаты работы соответствуют п. 4 паспорта научной специальности 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин».

Диссертация является завершённой работой, написанной автором самостоятельно. Новые научные результаты получены лично автором. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании научных результатов при проектировании спироидных передач.

Предложенные в диссертации решения аргументированы и являются новыми по сравнению с другими известными решениями в области расчета распределения нагрузки в зубчатых передачах (соответствие п. II.10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»).

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 печатных работах. В их число входят 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК (соответствие пп. II.11, II.12, II.13 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»), одна работа в журнале, входящем в международные базы цитирования Scopus/Web of Science. Материалы диссертации имеют хорошую апробацию, так как обсуждались на международных и российских конференциях и симпозиумах. Все заимствования выполнены корректно (соответствие п. II.14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»). Приведённые выше замечания имеют характер пожеланий для продолжения исследований.

Считаю, что автор диссертации – Санников Александр Михайлович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук по специальности 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин».

Официальный оппонент

Профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»  
д.т.н., профессор



Андрей Эрикович Волков

«28» мая 2021 г.

127994, Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1

Тел.: 8-499-972-94-35

E-mail: ae.volkov@stankin.ru

